

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA DOKONČOVACÍCH ZPŮSOBŮ OBRÁBĚNÍ

ANALYSIS OF COMPLETE METHOD MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VLADIMÍR PAVÉZKA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vladimír Pavézka

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza dokončovacích způsobů obrábění

v anglickém jazyce:

Analysis of complete method machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kompletní analýza dokončovacích metod obrábění.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Rozbor základních dokončovacích metod obrábění a jejich použití.

Stav povrchu po dokončovacím obrábění.

Experiment pro vybranou metodu dokončovacího obrábění.

Vyhodnocení výsledků experimentu.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

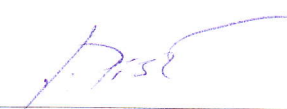
1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. KOČMAN, K. Speciální technologie – Obrábění. 2. vyd. Brno: PC- DIR Real, 1998. 236 s. ISBN 80-214-1187-2.


Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Vypracovaná práce je zaměřena na analýzu dokončovacích způsobů obrábění. V rámci této práce jsou charakterizovány jednotlivé metody a jejich vliv na stav povrchu obráběné plochy. V závěrečné části je praktická ukázka soustružení za použití břitových destiček ze slinutého karbidu a polykrystalického diamantu a jejich vyhodnocení.

Klíčová slova

Dokončovací způsoby obrábění, stav povrchu po dokončovacím obrábění, soustružení slinutými karbidy, soustružení diamantem.

ABSTRACT

This elaborate study is aimed at analysis of complete methods machining. There are characterized particular methods and their effect on the surface's quality of machined area in this study. Concluding part of the study includes practical demonstration of machining by using cemented carbide-tipped tool and polycrystalline diamond and evaluation of this demonstration.

Key words

Complete methods machining, the surface's quality after finishing cuts, cemented carbide turning , diamond turning.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVÉZKA, Vladimír. *Analýza dokončovacích způsobů obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Analýza dokončovacích způsobů obrábění vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

14. 10. 2011

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. A firmě CIE Ždánice, s.r.o. za umožnění uskutečnění experimentu.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod	8
1. Dokončovací způsoby obrábění	9
1.1 Abrazivní metody obrábění	9
1.1.1 Broušení.....	9
1.1.2 Honování	13
1.1.3 Lapování	15
1.1.4 Superfinišování	17
1.2 Beztřískové metody dokončování	19
1.2.1 Válečkování.....	19
1.2.2 Vyhlazování povrchu diamantem	21
1.3 Jemné obrábění	22
1.3.1 Slinuté karbidy	23
1.3.2 Cermety	24
1.3.3 Keramika.....	25
1.3.4 Polykrystalický diamant.....	26
1.3.5 Kubický nitrid boru.....	27
2. Stav povrchu po dokončovacím obrábění	29
2.1 Drsnost povrchu a rozměrová přesnost	29
2.1.1 Srovnání dosahovaných hodnot drsnosti povrchu Ra u dokončovacích způsobů obrábění.....	30
2.1.2 Srovnání dosahovaných hodnot rozměrové přesnosti IT u dokončovacích způsobů obrábění	31
2.2 Zbytková napětí.....	32
2.2.1 Zbytková napětí při broušení.....	33
2.2.2 Zbytková napětí při válečkování	34
2.3 Zpevnění povrchové vrstvy	35
3. Experiment.....	36
3.1 Metodika experimentu	36
3.1.1 Zkušební součást	36
3.1.2 Obráběcí stroj	37
3.1.3 Nástroj.....	38
3.1.4 Řezné podmínky.....	39
3.1.5 Metodika měření.....	40
3.2 Naměřené hodnoty	41
3.3 Srovnání naměřených hodnot s teoretickými hodnotami průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_t a největší výšky profilu Rz_t	43
3.3.1 Teoretická hodnota průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_t	43
3.3.2 Teoretická hodnota nejvyšší výšky profilu Rz_t	43
3.3.3 Srovnání naměřených hodnot Ra s teoretickými hodnotami průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_t	44
3.3.4 Srovnání naměřených hodnot Rz s teoretickými hodnotami nejvyšší výšky profilu Rz_t	45

3.4 Obecné vztahy statistické interpretace.....	46
3.5 Statistická interpretace naměřených hodnot	46
3.5.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a	46
3.5.2 Nejvyšší výška profilu R_z	52
3.6 Technicko-ekonomické zhodnocení.....	57
4. Vyhodnocení výsledků experimentu	59
5. Závěr.....	60
Seznam použitých zdrojů	61
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	63
Seznam příloh	66

ÚVOD

Obrábění je nejdůležitější technologickou operací při výrobě přesných strojních součástí. Při obrábění jsou na výrobu součástí kladeny různé požadavky. A to jakost povrchu, rozměrová přesnost, různé mechanické či fyzikální vlastnosti povrchové vrstvy nebo i vzhled povrchu. Vlastnosti obrobené plochy mají vliv na správnou funkci součásti, spolehlivost, životnost či vzhled. Realizace těchto požadavků dosahujeme metodami, které lze nazývat dokončovacími způsoby obrábění. Tyto metody představují poslední operaci při obrábění součástí.

V současné době je hlavní snahou ve strojírenství obráběcí procesy zrychlovat, zpřesňovat a zkvalitňovat. Důležité je danou problematiku sledovat i z ekonomického hlediska. Proto není vždy vhodné pořizování drahých technologií, například na principu abrazivního úběru materiálu, ale je zapotřebí implementovat progresivní technologie na stávající strojní zařízení. Pro dokončovací obrábění je jednou z možností využití řezných materiálů, kterými dosáhneme požadovaných výsledků. Mezi tyto řezné materiály patří slinuté karbidy, cermet, polykrystalický diamant, kubický nitrid bóru, keramika apod.

Využitím řezných materiálů z polykrystalického diamantu a slinutého karbidu se tato práce zabývá v experimentální části.

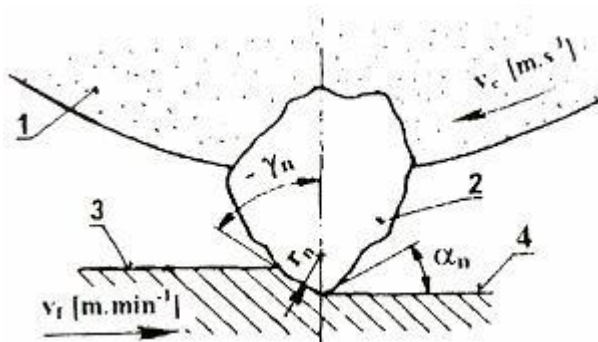
1. DOKONČOVACÍ ZPŮSOBY OBRÁBĚNÍ

1.1 Abrazivní metody obrábění

Jsou to metody, kde není definována geometrie břitu. Jejich využití je zejména u součástí, na kterých jsou požadovány vysoké parametry přesnosti obrobených ploch. Mezi tyto metody patří: broušení, honování, lapování, superfinišování.

1.1.1 Broušení

Broušení je technologie obrábění, při které dochází k úběru materiálu nástrojem s nedefinovanou geometrií ostří. Nástroj vykonává hlavní rotační pohyb. Brousicí proces se nejvíce podobá technologii frézování. Hlavními odlišnostmi jsou ale různorodý tvar brousících zrn a nepravidelné rozmístění na ploše brousícího nástroje. Řezná rychlost brousícího procesu se pohybuje v rozmezí 30 až 100 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ a při malých průřezech třísky (10^{-3} až 10^{-5} mm^2). Díky málo pevnému zakotvení brousících zrn ve vazbě kotouče má brousicí kotouč schopnost tzv. samoostření. V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího a vnitřního tření se určitá část třísky ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky kovu nebo shoří (jiskření).³



Obr. 1.1 Model záběru brousícího zrna (3)

v_c – řezná rychlost; v_f – posuvová rychlost; γ_n – normální úhel čela; α_n – normální úhel hřbetu; r_n – poloměr zaoblení ostří; 1 – brousicí kotouč; 2 – brousící zrna; 3 – obráběná plocha; 4 – obrobená plocha

Brousící zrna mají zpravidla negativní úhel čela γ_n a velký úhel hřbetu α_n , nepravidelný geometrický tvar (poloměr zaoblení ostří r_n), vysokou tvrdost, tepelnou odolnost. U brousícího procesu je za řeznou rychlost považována rychlost obvodová v_w .³

Řezná rychlost v_c (3):

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.1)$$

Kde: d_s ... průměr brousícího kotouče [mm],
 n_s ... frekvence otáčení brousícího kotouče [min^{-1}].

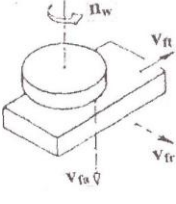
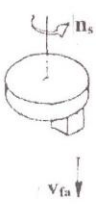
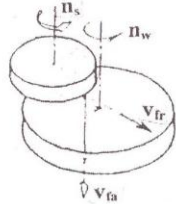
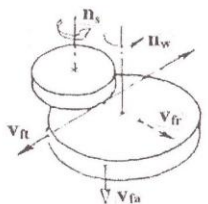
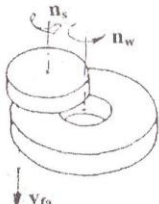
Obvodová rychlost obrobku v_w (3):

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} [m \cdot \min^{-1}] \quad (1.2)$$

Kde: d_w ... průměr obrobku [mm],
 n_w ... frekvence otáčení obrobku [\min^{-1}].

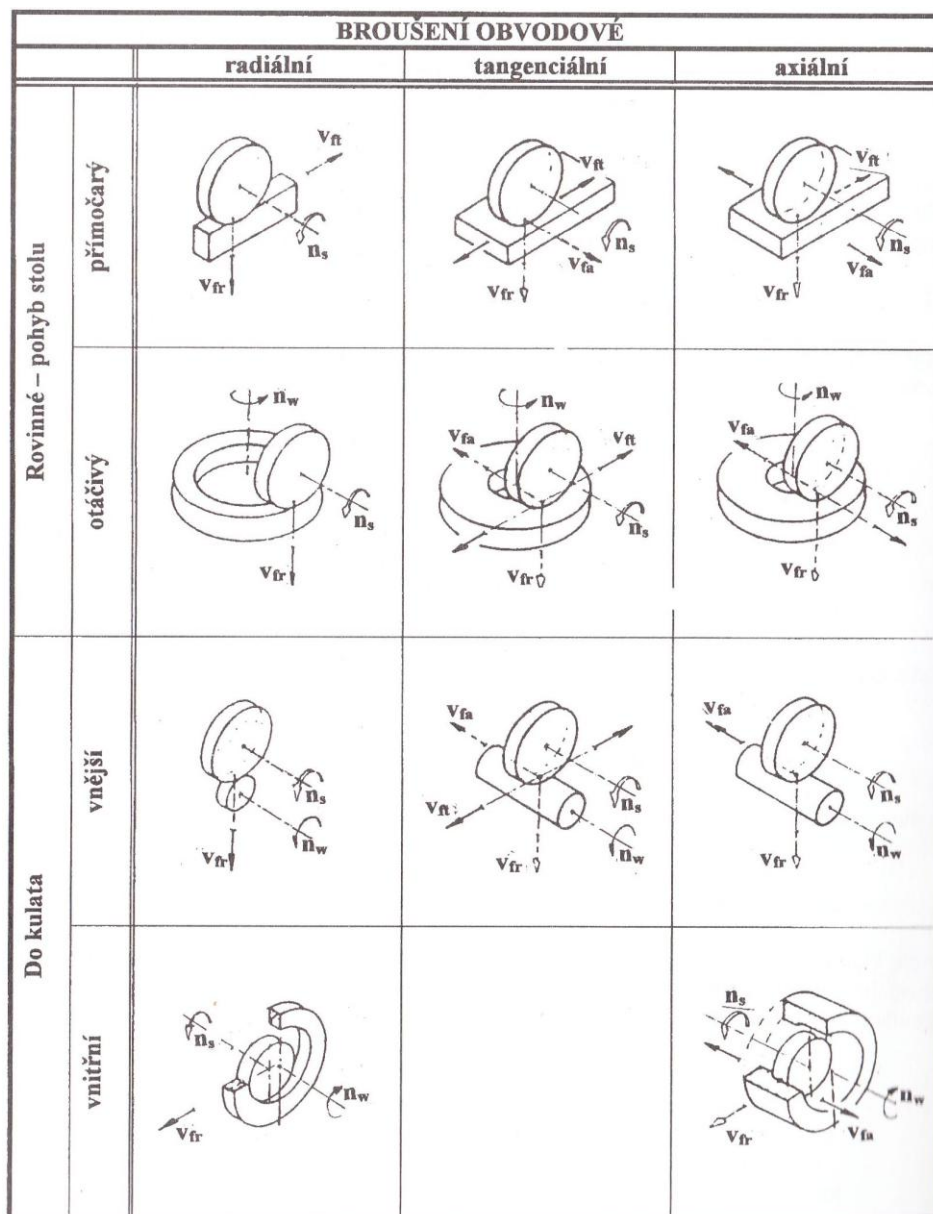
Řezná rychlost má vliv na kvalitu a hospodárnost procesu. Při malé řezné rychlosti dochází k rychlému opotřebení kotouče (vysoký tlak na jednotlivá zrna). Při vysokých rychlostech dojde ke zmenšení objemu třísky. To má za následek snížení tlakových sil působících na zrna a nedojde k vyloupnutí zrna (pálení obráběného povrchu, ucpání kotouče).³

Proces broušení má různé metody a dělíme ho podle více kritérií. Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření: rovinné broušení, broušení do kulata, broušení na otáčivém stole, tvarovací broušení, kopírovací broušení, broušení tvarovými brousicími kotouči. Podle aktivní části brousicího kotouče dělíme broušení na obvodové nebo čelní. Podle polohy kotouče k obrobku na vnější a vnitřní broušení. A podle hlavního pohybu posuvu stolu (na stole brusky je upevněn obrobek) vzhledem k brousicímu kotouči na axiální, tangenciální, radiální, obvodové zápichové a čelní zápichové broušení. Na obr. 1.3 jsou uvedeny metody obvodového broušení a na obr. 1.2 čelního.³

		BROUŠENÍ ČELNÍ		
		radiální	tangenciální	axiální
Rovinné – pohyb stolu	přímocárý			
	otáčivý			

Obr. 1.2 Vybrané způsoby čelního broušení (3)

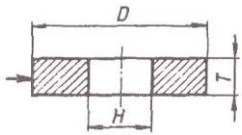
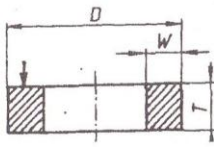
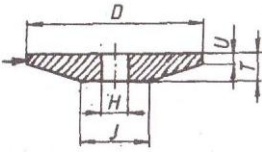
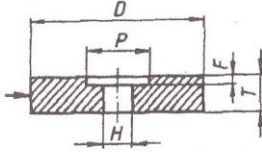
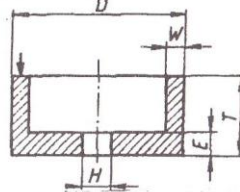
n_s – frekvence otáčení brousicího kotouče; n_w – frekvence otáčení obrobku; v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu; v_{fr} – radiální rychlost posuvu stolu; v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu stolu



Obr. 1.3 Vybrané způsoby obvodového broušení (3)

Broušením lze obrábět rovinné plochy, rotační, závit, ozubená kola, a různé tvary obrobků, které kopírují tvar brousícího kotouče. Technologie má uplatnění při obrábění součástí s vyššími požadavky na přesnost rozměrů (IT 3 až 11) a jakost povrchu (R_a 0,05 až 3,2).

Brousící nástroje tvoří brusiva vázaná v pojivech. Brousící zrna jsou převážně na bázi karbidu křemíku SiC nebo umělého korundu Al_2O_3 . Speciální využití mají brusiva z umělého diamantu nebo kubického nitridu boru. Pojivo může být keramické, pryskyřičné, magnositové nebo gumové. Brousící nástroje se vyrábějí v různých tvarech a velikostech. V největším rozsahu jako brousící kotouče. Ty se označují z hlediska tvarů, rozměrů, specifikace složení a maximální obvodové rychlosti dle ČSN ISO 0525.³

Typ	Vyobrazení	Označení - charakteristika
1		Kotouče ploché Typ 1 – profil – D x T x H
2		Kotouče prstencové Typ 2 – D x T x W
3		Kotouče jednostranně zkosené Typ 3 – D/J... x T/U ... x
5		Kotouče s jednostranným vybráním Typ 5 – D x T x H – P..., F
6		Kotouče hrncovité Typ 6 – D x T x H – W..., E

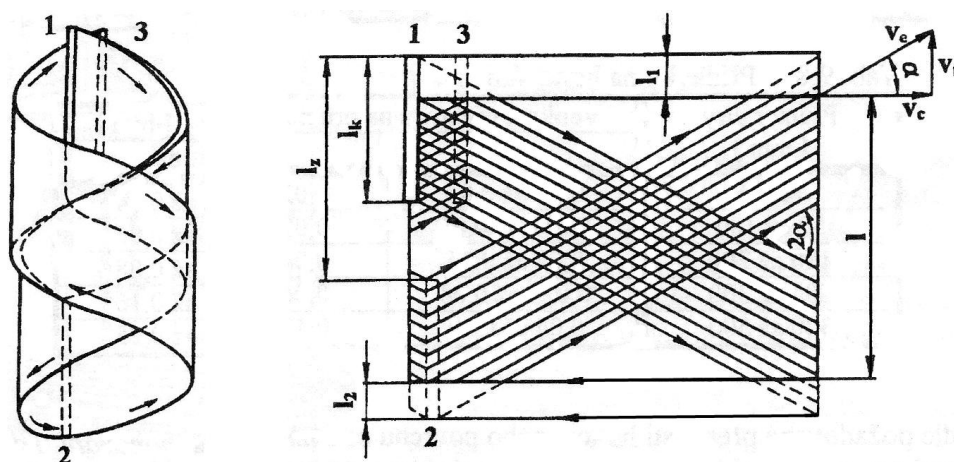
Obr. 1.4 Označování tvarů a rozměrů brousicích kotoučů - výběr (3)

Stroje pro broušení jsou vyráběny v různém provedení. Jejich odlišnosti jsou v konstrukčním provedení a v technologickém využití. Mezi základní stroje patří hrotové brusky (k broušení rotačních ploch), bezhrotové brusky (pro broušení vnějších a v malém rozsahu vnitřních rotačních ploch), brusky na díru (pro broušení vnitřních rotačních ploch), vodorovné rovinné brusky (pro broušení rovinných ploch), svislé rovinné brusky (pro broušení rovinných ploch) a speciální brusky (pro ostření nástrojů, broušení závitů, ozubení, vačkových hřídelů apod.).

1.1.2 Honování

Při honování dochází k zvýšení jakosti obráběné plochy za pomoci jemného brusiva vázaného v honovacích kamenech a za použití řezných kapalin. Ty jsou upevněny v honovací hlavě. Je to broušení malou rychlostí.

Při vnitřním honování vykonávají honovací kameny v díře složený šroubovitý pohyb, který je tvořen kombinací rotačního pohybu honovací hlavy s rychlostí v_c a posuvného vratného pohybu ve směru osy honování s rychlostí v_f . Dráhy zrn brusiva se přitom překrývají a na honovaném povrchu se objevují charakteristické křížové stopy, které svírají úhel 2α .³



Obr. 1.5 Kinematika honovacího procesu (3)

vlevo - pohyby honovacích kamenů, vpravo - rozvinutá plocha honovaného povrchu; 1 – počáteční poloha; 2 – poloha v dolní úvratí; 3 – poloha v jednom dvojdzvihu; v_c – řezná rychlost; v_f – posuvová rychlost; v_e – rychlost řezného pohybu; 2α – úhel křížení stop; l_k – délka honovacích kamenů; $l_{1,2}$ – horní a dolní přeběh; l_z – zdvih honovací hlavy

Úhel 2α ovlivňuje průběh honování. Závislost hodnoty úhlu α je uvedena ve vzorci 1.1. Doporučené hodnoty jsou 20° až 55° . Větší úhel znamená menší drsnost honované plochy. Do řezných podmínek patří také přitlačný tlak p_k [MPa] (0,2 až 1,5 MPa), jenž přitlačuje k honovanému povrchu přitlačné kameny.

Závislost hodnoty úhlu α na posuvové a řezné rychlosti (3):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_f}{v_c} \quad (1.1)$$

Kde: v_f ... posuvová rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 v_c ... řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$].

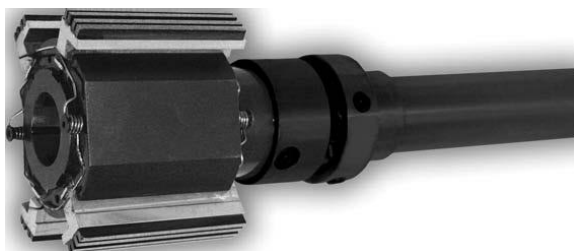
Jako řezné kapaliny se používají směsi petroleje s olejem nebo kyselinou olejovou. Řezné kapaliny snižují řezné síly, odebírají teplo a vyplachují honovanou soustavu.^{3, 6}

Jednostupňové honování – využití jednoho nástroje pro hrubování i dokončování (snížení tlaku nebo p_k nebo zmenšení úhlu 2α).

Dvoustupňové honování – pro hrubování se využije nástroje hrubozrnnějšího a pro dokončování druhého nástroje s jemnějším zrnem.

Nejčastěji se využívá k obrábění vnitřních válcových ploch (vnitřní honování) průchozích i neprůchozích. O rozsahu průměrů 1 až 750 mm a délek až 24m. Malé využití má u vnějších válcových ploch (vnější honování). Metoda se používá při dokončování výroby válců spalovacích motorů, pneumatických, hydraulických a brzdových válců, bubnů, pouzder apod. Honují se kalené i nekalené oceli, litiny, hliníkové slitiny, neželezné kovy, slinuté karbidy, tvrdé povlaky. Honováním dosahujeme vysoké jakosti a přesnosti geometrického tvaru (odstranění kuželovitosti, ovality, soudkovitosti). Dosahované parametry jsou IT 3 až 8 a Ra 0,05 až 0,8 μm .³

Honovací nástroj je tvořen z radiálně stavitelných honovacích kamenů, jenž jsou rovnoměrně upevněny po obvodě honovací hlavy. Upínání kamenů je řízeno hydraulicky, pneumaticky nebo mechanicky. Pro obrábění litiny jsou kameny z SiC, pro oceli z Al_2O_3 . Při vysokých požadavcích na jakost se používají kameny ze syntetického diamantu nebo kubického nitridu bóru. Pojivo je keramické, pro velmi jemné honování bakelitové. U diamantu se nejčastěji používá pojivo kovové.³



Obr. 1.6 Honovací hlava firmy SUNNEN, diamantové brusivo (5)

Honovací stroje dělíme podle polohy vřeten na stroje svislé a vodorovné. Podle počtu vřeten na jednovřetenové a vícevřetenové.

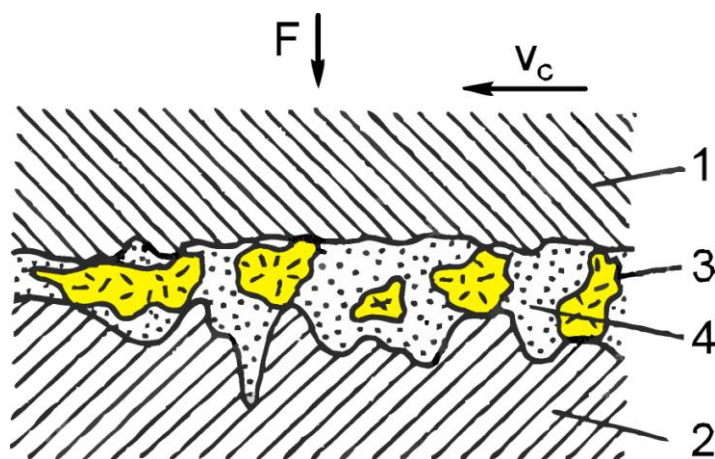


Obr. 1.7 Svislý jednovřetenový honovací stroj SV-1000 firmy SUNNEN (5)

1.1.3 Lapování

Lapování je druh broušení, při kterém dochází k úběru materiálu volným brusivem. Brusivo se přivádí v kapalině nebo měkkou pastou mezi lapovací nástroj a obráběnou součást. Řezný pohyb volného brusiva je vyvolán pohybem lapovacího nástroje, který je k ploše obrobku nepravidelný.

Používá se pro dokončování rovinných, válcových a tvarových vnějších ploch. A to pro lapování funkční plochy měřidel, důležitých závitových spojení, ozubení, součástí motorů automobilů. Dosahujeme velmi vysoké rozměrové přesnosti (IT 1 až 5) a nízké drsnosti povrchu (R_a 0,012 až 0,4 μm). Nevýhodou lapování je velká pracnost, malá produktivita a vysoké náklady. Proto se lapování nahrazuje honováním nebo superfinišováním (pokud je to z hlediska požadované IT a R_a možné).³



Obr. 1.8 Schéma řezného procesu při lapování (3)

1 – lapovací nástroj; 2 – lapovaná část; 3 – brusivo; 4 – lapovací prostředí; v_c – rychlost lapování; F – síla vyvolávající tlak p_k mezi nástrojem a obrobkem

Lapovací nástroje mají negativní tvar lapovaných ploch. Vyrábějí se z jemnozrnné perlitické nebo feritické litiny, z mědi, měkké oceli, olova, plastických hmot. Pro velmi jemné lapování se využívají nástroje z kalené oceli nebo tvrdě chromované nástroje. Pro ruční lapování rovinných ploch se používají lapovací desky. Pro lapování děr trny a pro lapování vnějších válcových ploch lapovací prstence. U strojního lapování rovinných ploch se používají lapovací kotouče litinové nebo brousící kotouče s vázaným brusivem a keramickou vazbou. Pro vnější rotační plochy se používá bezhrotý zapichovací nebo průběžný způsob, kdy nástrojem je kotouč s brusivem v keramické vazbě. Brusivo pro lapování je obdobné jako u honování. Pro měkké i kalené oceli Al_2O_3 , pro lapování litiny, skla, keramiky SiC . Pro tvrdé materiály karbid boru nebo diamantové mikroprášky.^{3, 6}



Obr. 1.9 Lapovací kotouč s axiálními drážkami (24)

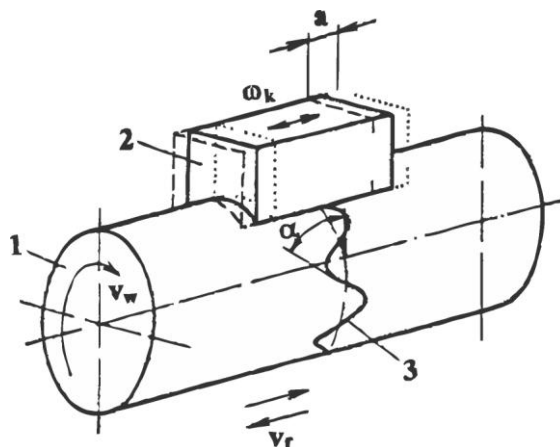
Lapovací stroje jsou buď univerzální pro lapování rovinných i válcových ploch, nebo speciální pro lapování určitého druhu ploch (boky zubů kol, čepy klikových hřídelů, valivá tělíska valivých ložisek). Pro lapování vnějších válcových a rovinných ploch se používají dvoukotoučové lapovací stroje se svislými osami lapovacích kotoučů. U lapování děr se využívá stroje se svislým pracovním vřetenem. Pro dlouhé otvory zase naopak stroje s vodorovným vřetenem.^{3, 6}



Obr. 1.10 Svislý lapovací stroj Servo RS 1900 firmy PR HOFMAN (7)

1.1.4 Superfinišování

Superfinišování je druh broušení, při kterém se odstraňují vrcholky nerovností z dokončovaného povrchu superfinišovacím kamenem, jenž je tvořen velmi jemnými zrna brusiva. Je to vysoce produktivní metoda dokončovacího obrábění pro vnější a vnitřní rotační a rovinné plochy. Superfinišování je charakterizováno kmitavým pohybem superfinišovacího kamene, definovanou silou vyvolávající nízký tlak na obráběnou plochu a malými řeznými rychlostmi.^{3,6}



Obr. 1.11 Kinematické schéma superfinišování (3)

1 – obrobek; 2 – superfinišovací kámen; 3 – stopa po jednom zrna brusiva; v_w – rychlost otáčení obrobku; v_f – rychlost podélného posuvu obrobku; a – amplituda; ω_k – frekvence kmitavého pohybu; α – úhel sklonu stopy po jednom zrna brusiva

Řezný pohyb při superfinišování vzniká superpozicí rotačního pohybu součásti o rychlosti v_w (10 až 80 m.min⁻¹) a kmitavého pohybu nástroje o frekvenci ω_k (500 až 3000 kmitů za minutu). Amplituda a je 0,1 až 10 mm. Rychlost kmitavého pohybu v_k se volí 2 až 15 m.min⁻¹. Určí se podle vztahu 1.2. Tlak p_k (0,1 až 0,4 MPa), jenž přitlačuje superfinišovací kameny k obráběné ploše, se zvětšováním nosného podílu poklesne na minimum, proces dále nepokračuje.³

Rychlost kmitavého pohybu (3):

$$v_k = \frac{a \cdot \omega_k}{1000} \quad (1.2)$$

Kde: a ... amplituda [mm],
 ω_k ... frekvence [min⁻¹].

Průběh superfinišování především ovlivňuje rychlost kmitavého pohybu, obvodová rychlost, velikost přitlačného tlaku a viskozita řezné kapaliny.³

Závislost řezné rychlosti na obvodové (3):

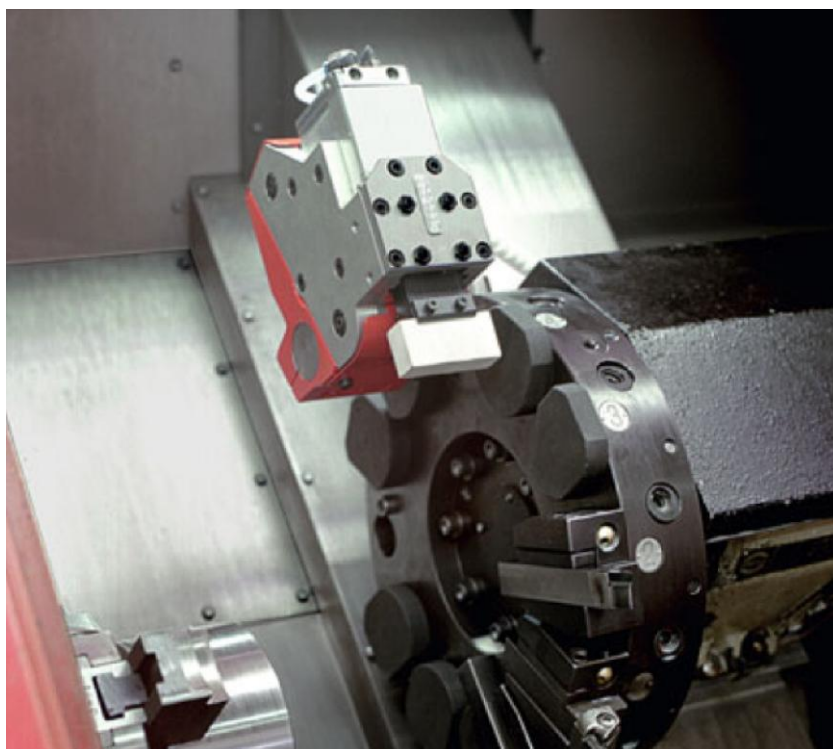
$$\tan \alpha = \frac{v_k}{v_w} \quad (1.3)$$

Kde: v_k ... rychlost kmitavého pohybu [m.min⁻¹],
 v_w ... rychlost rotačního pohybu [m.min⁻¹].

Technologie má nejčastější využití v automobilovém průmyslu, při výrobě valivých částí ložisek, hydraulických zařízení, čepů kluzných ložisek. Superfinišují se součásti z kalené i nekalené oceli, litiny, slitin těžkých kovů a z plastů. Superfinišováním dosahujeme přesnosti rozměrů IT 2 až 4, a drsnosti plochy Ra 0,025 až 0,4 μm .

Superfinišovací nástroje jsou tvořeny kameny. Pro obrábění oceli se používá jako brusivo umělý korund s keramickým či bakelitovým pojivem. Pro litiny a oceli nižších pevností se využívá karbidu křemíku. Pro velmi tvrdé materiály (slnuté karbidy) kubický nitrid boru nebo diamant. Jako řezná kapalina se používají petrolej, směs petroleje s minerálním olejem nebo oleje s aditivy.

Superfinišovací stroje jsou jednovřetenové nebo vícevřetenové. V kusové výrobě se využívá hrotových soustruhů či brusek, ke kterým se přidají přídatná zařízení pro superfinišování.



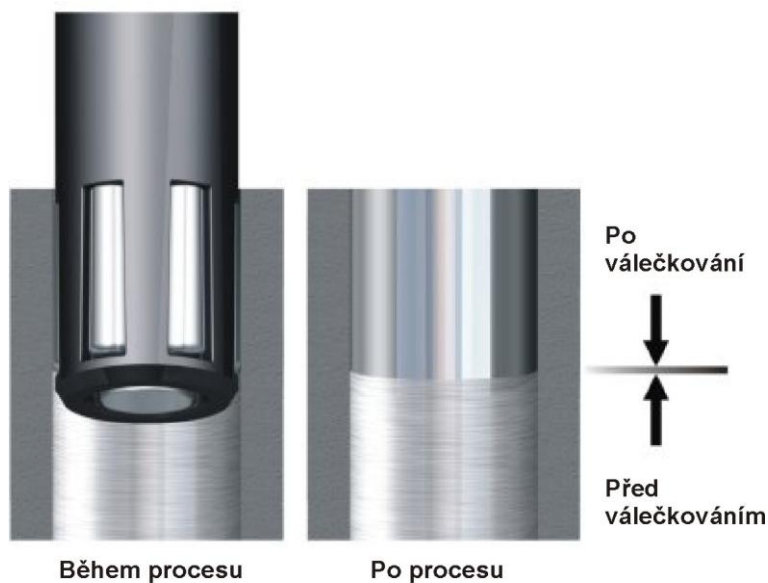
Obr. 1.12 Přídatné superfinišovací zařízení Supfina 90 pro obráběcí stroje (25)

1.2 Beztrískové metody dokončování

Spočívají v plastické deformaci povrchové vrstvy. Deformace probíhá do hloubky několika setin až desetin milimetrů. Dojde ke zlepšení parametrů struktury, ke zvýšení pevnosti a tvrdosti, meze únavy, odolnosti proti opotřebení a korozi.

1.2.1 Válečkování

Použitím tvrdého tvářecího prvku (váleček, kulička, hladící trn) na dokončovanou plochu se vyvine tlak, který v místě styku nástroje a obrobku způsobuje plastickou deformaci. Rozlišujeme dva druhy válečkování, statické a dynamické válečkování. Při statickém válečkování má tvářecí síla konstantní velikost, nebo se v průběhu pozvolna mění. Váleček se odvaluje po povrchu součásti. Výsledná jakost obrobku je závislá na průměru aktivního povrchu válečku. Menší průměr zvyšuje hloubku zpevnění, větší průměr snižuje hodnotu drsnosti R_a . Při dynamickém válečkování je nástroj v kontaktu jen v časově omezeném silovém impulzu. Silový impulz je na váleček vyvozen různými způsoby (mechanicky pomocí rotujícího kužele nebo kroužkem s vačkovými plochami). Při dynamickém válečkování dosahujeme velké hloubky zpevnění. Přítlační síla při válečkování může být vyvozena mechanicky, pneumaticky, magneticky, odstředivou silou nebo kombinovaně.^{3, 8}



Obr. 1.13 Stav povrchu před a po válečkování (9)

Válečkují se nejčastěji vnější a vnitřní válcové a kuželové plochy. Lze válečkovat tvárné materiály s pevností do 1250 MPa a minimální tažností 8%. Dosahujeme rozměrové přesnosti IT6 až IT8 a drsnosti povrchu R_a 0,02 až 0,6 μm . Válečkováním dosáhneme zpevnění povrchu, lepší korozní odolnosti, vysoké hospodárnosti. Technologie má nízké investiční náklady.^{3, 8}

Nástroje pro válečkování dělíme podle obráběné plochy na nástroje pro válečkování vnitřních a vnějších ploch, pro válečkování čelních ploch a vnitřních kuželových ploch. Nástroje se dále dělí tvarem tvářecího tělíska, charakterem tvářecí síly, druhem materiálu obrobku atd. Nástroj s obrobkem je nutné chladit a mazat. Pro klasický proces válečkování stačí běžná chladicí emulze. U složitějších operací je zapotřebí minerálních olejů.⁸



Obr. 1.14 Vlevo nástroj pro statické válečkování vnějších ploch, vpravo nástroj pro dynamické válečkování vnitřních ploch (10)

Stroje pro válečkování jsou speciálně zhotovené pro danou technologii nebo lze technologie aplikovat na univerzálních obráběcích strojích, pokud to dovolí parametry stroje (tuhost, výkon, přesnost atd.). Na obr. 1.15 Je válečkovací stroj vhodný pro vysoce produktivní výrobu válečkováním. Pro opracování vnějších průměrů válcových ploch.



Obr. 1.15 Válečkovací stroj RM 2/35 firmy Bauglies AG (10)

1.2.2 Vyhlazování povrchu diamantem

Je to technologie podobná válečkování, ale nedochází zde k odvalování nástroje (diamant). Nástroj s kuželovou špičkou je přitlačován konstantní silou k povrchu součásti. Díky menší kontaktní ploše mezi nástrojem a obrobkem dosahujeme plastické deformace za studena při působení nižších sil.¹¹



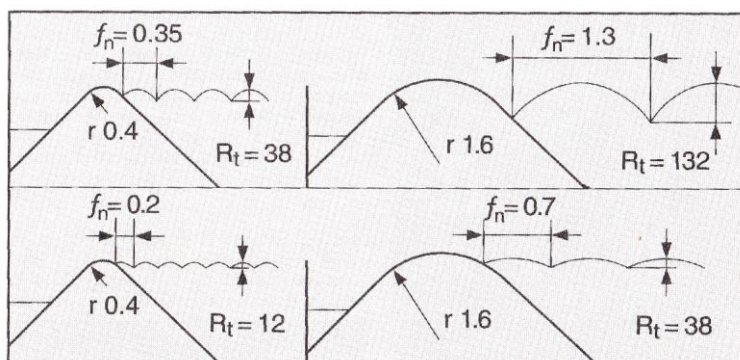
Obr. 1.16 Diamantový nástroj pro vnější vyhlazování (10)

Hlazením povrchu diamantem můžeme obrábět materiály až do tvrdosti 60 HRC. Nejvyššího účinku dosahujeme u tepelně zpracovaných ocelí na 50 až 55 HRC. Díky technologii dosáhneme zvýšení meze únavy a únosnosti, větší odolnosti součásti proti opotřebení a korozi. Dosahovaná drsnost povrchu je až $Ra\ 0,2\mu m$.^{3, 11}

Nástrojem pro vyhlazování povrchu je diamantová kuželová špička, která má definovaný poloměr zaoblení. Důležitým předpokladem pro správnou funkci nástroje je jeho chlazení.

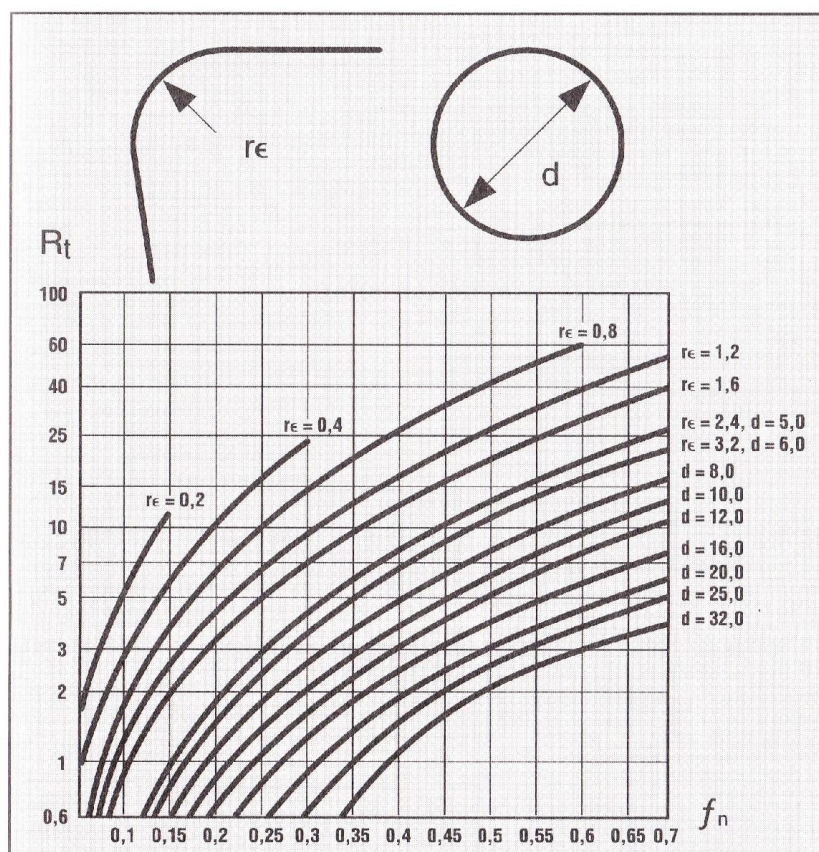
1.3 Jemné obrábění

Vysoké jakosti obráběné plochy můžeme také dosáhnout obráběním (soustružením) poslední vrstvy malými průřezy třísek nebo hladícími nástroji. Při soustružení načisto určuje poloměr špičky s rychlostí posuvu stav a jakost obrobeného povrchu obrobku. Největší podíl práce při obrábění vykonává špička bříty. Jakost obrobené plochy může často zlepšit vyšší řezná rychlost a pozitivní geometrie bříty.^{1, 6}



Obr. 1.17 Vliv poloměru špičky a posuvu na jakost obrobeného povrchu (1)

Obr. 1.18 znázorňuje poměr mezi teoretickými hodnotami R_t a rychlostí posuvu f_n , poloměrem špičky r_ϵ nebo průměrem vyměnitelné břitové destičky d . Z diagramu lze vyčíst vhodné výchozí hodnoty pro uvažované obrábění.



Obr. 1.18 Teoretické hodnoty R_t pro určité kombinace posuvu a poloměru špičky (1)

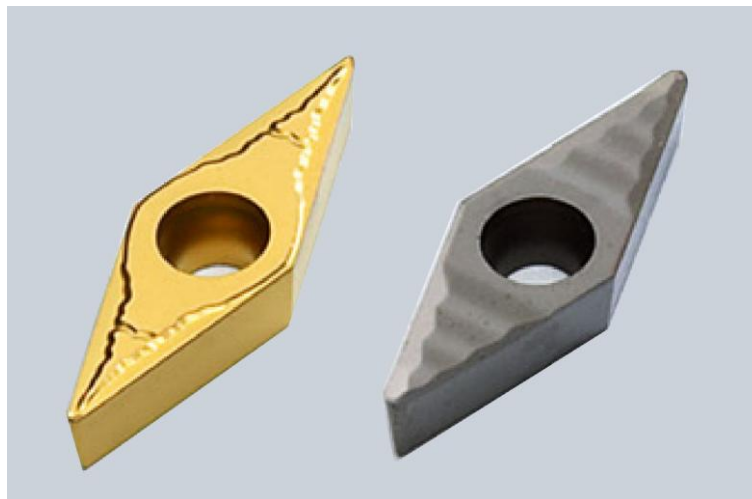
Důležitým vlivem na požadovanou jakost obráběné plochy je volba řezného materiálu, mezi které patří povlakované a nepovlakované slinuté karbidy, cermety, řezná keramika a tzv. supertvrdé řezné materiály (kubický nitrid boru a polykrystalický diamant). Při volbě řezného materiálu se přihlíží hlavně k materiálu obrobku, který má být obráběn.¹

Při jemném soustružení vnějších rotačních ploch za použití břitové destičky ze slinutého karbidu dosahujeme přesnosti rozměrů IT 7 až 9 a drsnosti plochy Ra 0,4 až 1,6 μm . U břitové destičky z polykrystalického diamantu lze dosáhnout ještě lepších výsledků a to IT 5 až 7 a Ra 0,2 až 0,8 μm .³

1.3.1 Slinuté karbidy

Slinutý karbid (zkratka SK) je řezný materiál obsahující tvrdé částice karbidu, které jsou vázány kovovým pojivem. Je to produkt práškové metalurgie. Karbidy jsou velmi tvrdé, velikost částic se pohybuje v rozmezí 1 až 10 μm a tvoří 80 až 95% celkového objemu řezného materiálu. Mezi nejdůležitější patří karbid wolframu WC, karbid titanu TiC, karbid tantalu TaC a karbid niobu NbC. Jako pojivo se ve většině případů používá kobalt Co.^{1,3}

Břítové destičky z SK jsou normalizovaných tvarů a rozměrů. Nejčastěji se upínají mechanicky na řeznou část nástroje, v malém množství jsou k nástroji připájené. Vrtáky a frézy malých rozměrů se vyrábějí jako monolitické. SK jsou vyráběny jako nepovlakované nebo jsou opatřeny povlakem z tvrdých materiálů (např. TiN, TiCN nebo Al_2O_3). Povlaky mohou být jedno- nebo vícevrstvé.^{1,3}



Obr. 1.19 Břítová destička ze slinutého karbidu (22)

Slinuté karbidy jsou v dnešní době nejpoužívanějším řezným materiálem pro obrábění kovů. Pro jednodušší orientaci mezi různými vlastnostmi SK byl zaveden klasifikační systém ISO. Dle ČSN ISO 516 se SK řadí v závislosti na svém použití do tří skupin.^{1,3}

SK typu P (označené modrou barvou) jsou určeny pro obrábění železných kovů se vznikem dlouhé třísky (oceli, oceli na odlitky, temperované litiny).³

SK typu M (označené žlutou barvou) jsou určeny pro obrábění železných kovů se vznikem dlouhé i krátké třísky a pro obrábění neželezných kovů (manganové oceli, austenitické oceli, oceli na odlitky)³

SK typu K (označené červenou barvou) jsou určeny pro obrábění železných kovů s krátkou třískou (šedé litiny), neželezných kovů (měď, bronz, hliník) a nekovových materiálů.³

Pro dokončovací operace (soustružení načisto) lze využít SK označovaných P01 a K01. Nepovlakované SK mají převážně využití při obrábění hliníku a jeho slitin.

1.3.2 Cermety

Cermet je řezný materiál obsahující tvrdé částice tvořeny karbidem titanu (TiC), karbonitridem titanu (TiCN) nebo nitridem titanu (TiN) v kovovém pojivu (Ni, Mo, Co), vyráběný práškovou metalurgií. Název cermet vychází ze dvou slov CERamic/METal. To vyjadřuje označení keramických částic v kovovém pojivu.^{1, 3}



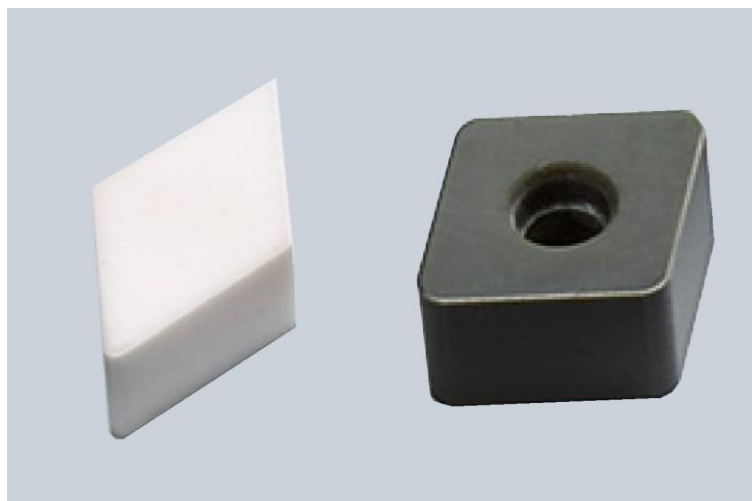
Obr. 1.20 Vyměnitelná břitová destička z cermetu (23)

Mezi hlavní vlastnosti cermetů patří vysoká odolnost proti opotřebení hřbetu, vysoká chemická stabilita a tvrdost za tepla, malý sklon k vytváření nárůstku a oxidačnímu opotřebení. Tvrdost cermetů je srovnatelná se slinutými karbidy, pevnost a houževnatost je nižší.

Cermet v podobě vyměnitelných břitových destiček je vhodný k obrábění oceli, litiny, lité oceli, neželezných kovů a snadno obrobitelných slitin. Cermet je vhodný pro dokončovací operace při obrábění oceli.

1.3.3 Keramika

Řezná keramika je převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Mezi hlavní výhody řezné keramiky patří: vysoká tvrdost, vysoká tvrdost za tepla, chemická inertnost vůči materiálu obrobku, dlouhá trvanlivost bříty, vysoká stálost (až 1600°C), použitelnost při řezných rychlostech 300 až 1600 m.min⁻¹. Řezná keramika je velmi křehká a má nízkou tepelnou vodivost.^{1, 2, 3, 13}



Obr. 1.21 Keramické břitové destičky (22)

Keramiku dělíme na dva základní typy, a to na keramiku na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) a keramiku na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4). Keramiku na bázi oxidu hlinitého dále dělíme na čistou (oxidickou), směsnou a vyztuženou.¹

Čistá keramika obsahuje až 99,9% oxidu hlinitého Al_2O_3 a má relativně nízkou pevnost a houževnatost a nízkou tepelnou vodivost. Přidáním oxidu zirkoničitého (až do 20%) lze zlepšit vlastnosti čisté keramiky. Barva čisté keramiky lisované za studena je bílá, u lisované za tepla je barva šedá. Vhodnost čisté keramiky je pro dokončovací soustružení šedé litiny, uhlíkových a nízkolegovaných ocelí.^{1, 2, 3}

Směsná keramika na bázi oxidu hlinitého obsahuje z 20 až 40% přísadu karbidu titaničitého TiC . V porovnání s čistou keramikou má větší odolnost proti teplotním a mechanickým rázům. Barva směsné keramiky vyráběné za tepla je černá. Vhodnost použití směsné keramiky je pro frézování šedé litiny a oceli, pro soustružení načisto a jemné soustružení cementačních nebo zušlechťených ocelí a tvrdé litiny.^{1, 3}

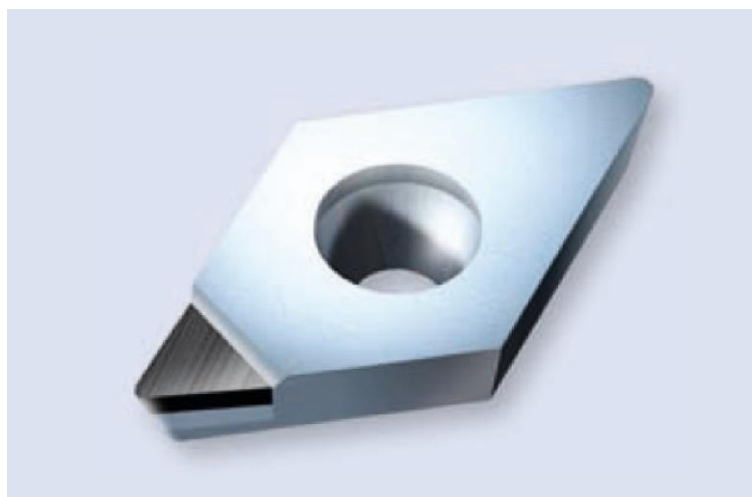
Vyztužená keramika na bázi oxidu hlinitého, nazývaná také keramika vyztužená viskerem, je obohacena vlákny krystalu z karbidu křemíku. Tato vlákna se nazývají viskery a mají průměr cca 1 μm a délku více než 20 μm a jejich podíl v řezném materiálu činí asi 30%. Břitové destičky vykazují zvýšenou houževnatost, pevnost v tahu a odolnost proti tepelnému šoku. Barva destiček vyráběných za tepla je zelená. Vhodnost použití vyztužené

keramiky je pro obrábění žáruvzdorných slitin, kalené oceli, šedé litiny a při obrábění přerušovaným řezem.^{1,3}

Keramika na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) je vysoce odolná proti mechanickému porušení bříty. Oproti keramice na bázi oxidu hlinitého má vyšší odolnost proti teplotnímu šoku a lepší houževnatost. Proti slinutým karbidům si zachovává vysoký stupeň tvrdosti za vysokých teplot. Keramika na bázi nitridu křemíku je vhodná pro obrábění šedé litiny.^{1,3}

1.3.4 Polykrystalický diamant

Polykrystalický diamant (česká zkratka: PKD, anglická: PCD) je synteticky vyrobený materiál a s kubickým nitridem boru se řadí mezi tzv. supertvrdé rezné materiály. Svou tvrdostí dosahuje téměř přírodního monokrystalického diamantu. Jemné krystaly diamantu jsou spojovány slinováním za vysokých teplot a tlaků. Poloha krystalů je nahodilá a v žádném směru nevytváří místa, která by mohla být zdrojem lomu.^{1,2,3}



Obr. 1.22 Břítová destička s připájeným roubíkem z polykrystalického diamantu (14)

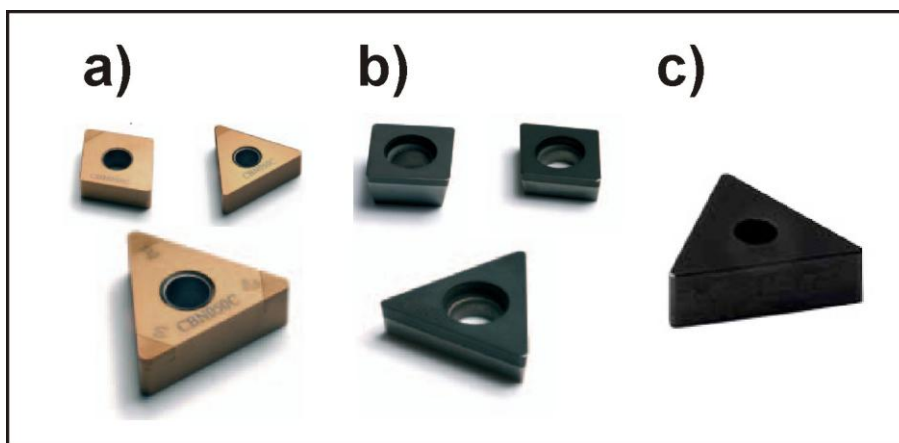
Malé bříty z PKD jsou pevně uchyceny na vyměnitelné břítové destičce ze slinutého karbidu, která jim zaručuje pevnost a odolnost proti tepelným a rázovým šokům. Břítové destičky z PKD vyžadují robustní tuhé nástroje, stroje s dostatečnou tuhostí a vysokým výkonem. Dále jsou vyžadovány vysoké rezné rychlosti, které při obrábění slitin hliníku s vysokým obsahem křemíku mohou dosahovat až $5000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Nástroje lze chladit běžnými procesními kapalinami. Ale podmínkou chlazení je, aby kapalina byla do místa řezu dodávána pod vysokým tlakem. Teploty v oblasti řezání nesmí překročit 600°C . PKD nesmí být použit pro obrábění železných materiálů (oceli, litiny) a není vhodný pro obrábění houževnatých materiálů s vysokou pevností.^{1,13}

Svojí vysokou tvrdostí je schopen odolávat vysokému abrazivnímu opotřebením (vysoká životnost břítových destiček). Hlavní oblastí využití rezného materiálu z PKD je soustružení abrazivních slitin hliníku a křemíku.

Dále se využívá pro obrábění nekovových materiálů (kompozitní materiály, umělé pryskyřice, pryž, plasty, uhlík, předslinovaný slinutý karbid, předslinovaná keramika) a kovů (mědi a jeho slitin, slitin magnézia, slitin zinku, olova). Využití PKD je typické pro obrábění načisto a jemné obrábění při soustružení a vrtání, kde lze dosáhnout přesnosti rozměrů IT 5 až 7 a drsnosti plochy R_a 0,2 až 0,8 μm .^{1, 2, 3}

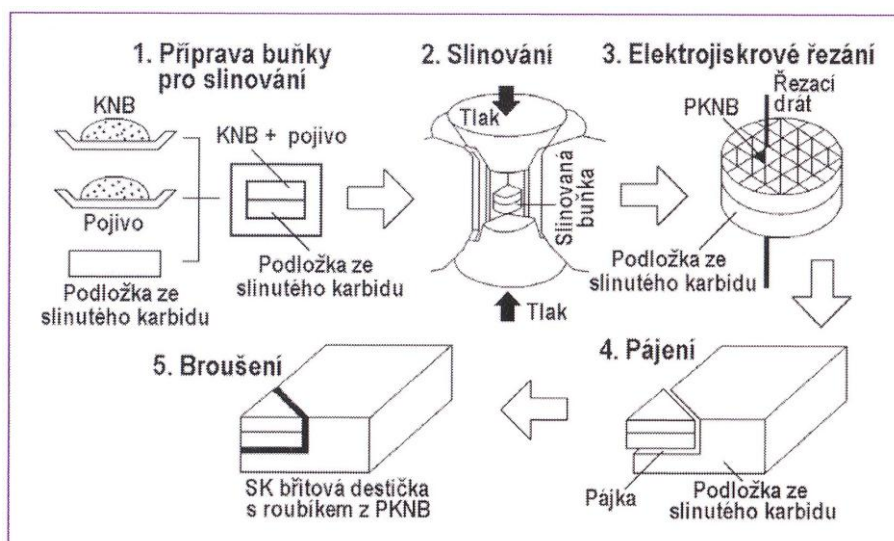
1.3.5 Kubický nitrid boru

Kubický nitrid boru (česká zkratka: PKNB nebo KNB, anglická: CBN) je tvrdý řezný materiál, jehož tvrdost překonává pouze diamant. Vyrábí se při vysokých teplotách a tlacích, jejichž působením se dosáhne spojení kubických krystalů boru s keramickým nebo kovovým pojivem. Svojí hustou polykrystalickou strukturou je velmi podobný polykrystalickému diamantu.^{1, 3}



Obr. 1.23 PKNB břitové destičky a) destička s připájeným roubíkem, b) destička se silnou vrstvou PKNB, c) monolitická destička (15)

Nástroj z PKNB vykazuje vysokou tvrdost i při extrémních teplotách (2000°C), dobrou chemickou stabilitu a velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Vyměnitelné břitové destičky jsou vyrobeny ze slinutého karbidu, do jehož vybrání je připájen segment z PKNB (roubík), který tvoří řeznou část. Nebo se vyrábí jako monolitické vyměnitelné destičky z PKNB (nejčastěji kruhového tvaru). Proces výroby vyměnitelných břitových destiček PKNB je znázorněn na obr. 1.24. Analogicky platí i pro výrobu břitových destiček z PKD.^{3, 13}



Obr. 1.24 Proces výroby vyměnitelných břitových destiček z PKNB (13)

Uplatnění destiček z PKNB je při soustružení kalené oceli a litiny, tvrdých a žáruvzdorných materiálů, kobaltových a niklových slitin. I přes jeho vysokou pořizovací cenu, bývá jeho nasazení jako náhrada za broušení při dokončovacím obrábění výhodné z hlediska integrity takto obrobeného povrchu. Jakost obrobeného povrchu se pohybuje kolem $Ra\ 0,3\mu m$. Minimální doporučená tvrdost obráběného materiálu je 45 HRC. Při obrábění materiálů s nižší tvrdostí je použití PKNB neekonomické.^{1, 2, 13}

2. STAV POVRCHU PO DOKONČOVACÍM OBRÁBĚNÍ

Dokončovací obráběním vzniká nový povrch obráběné součásti. Kromě geometrických změn obráběné součásti se také mění vlastnosti povrchové vrstvy, které se liší od vlastností základního materiálu. Integrita povrchu popisuje tyto vlastnosti povrchu a jeho kvalitu. Mezi složky integrity povrchu patří: drsnost povrchu, geometrická přesnost, změny tvrdosti v povrchové vrstvě, změny struktury v povrchové vrstvě, tepelné změny, trhliny a zbytková napětí. Integrita povrchu obráběných součástí má vliv na jejich provozní spolehlivost a životnost, zvláště u součástí pracujících za vysokých stavů napjatosti, při vysokých teplotách nebo v korozním prostředí.^{16, 17}

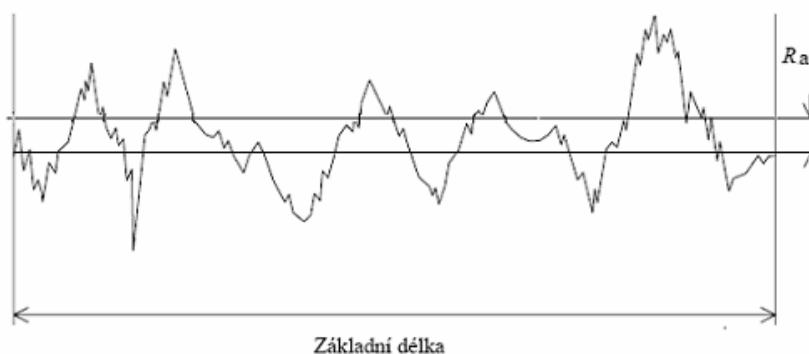
Na integritu povrchové vrstvy má největší vliv poslední operace. Při nevhodně zvoleném sledu operací může zůstat zachováno v povrchové vrstvě ovlivnění z operací předchozích.²⁰

2.1 Drsnost povrchu a rozměrová přesnost

Drsnost a rozměrová přesnost jsou základními kvalitativními charakteristikami pro hodnocení kvality obrobené plochy. Drsnost povrchu je přesně určena normou ČSN EN ISO 4287. V normě jsou popsány různé parametry profilu povrchu, metodiky jejich měření a jejich určení. Mezi základní používané parametry profilu povrchu patří hodnoty R_z (největší výška profilu) a R_a (průměrná aritmetická úchylka). Důležitou hodnotou je také křivka nosného podílu.^{16, 17, 19}



Obr. 2.1 Grafické znázornění největší výšky profilu R_z (18)



Obr. 2.2 Grafické znázornění průměrné aritmetické úchylky profilu R_a (18)

Základní vlivy na drsnost povrchu dokončovacím způsobem obrábění jsou: vliv minimální hloubky třísky, fyzikální vlastnosti obrobku (tvrdost materiálu), opotřebení nástroje a jeho řezivost, pracovní prostředí, homogenita materiálu apod.¹⁶

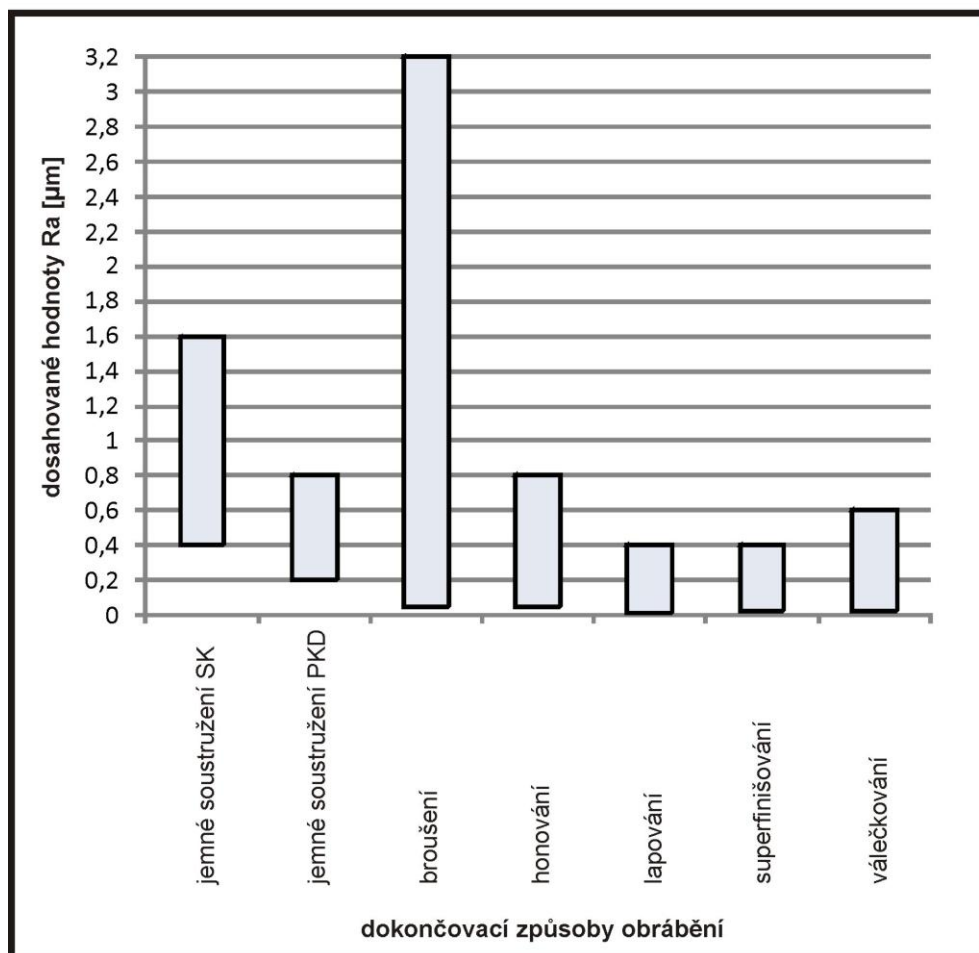
Výpočet teoretické největší výšky profilu Rz_{teor} (16):

$$Rz_{teor} = \frac{f^2}{8 \cdot r} + \frac{a_{pmin}}{2} \cdot \left(1 + \frac{r \cdot a_{pmin}}{2} \right) \quad (2.1)$$

Kde: f ... posuv na otáčku [mm],
 a_{pmin} ... minimální hloubka řezu [mm],
 r ... poloměr nástroje [mm].

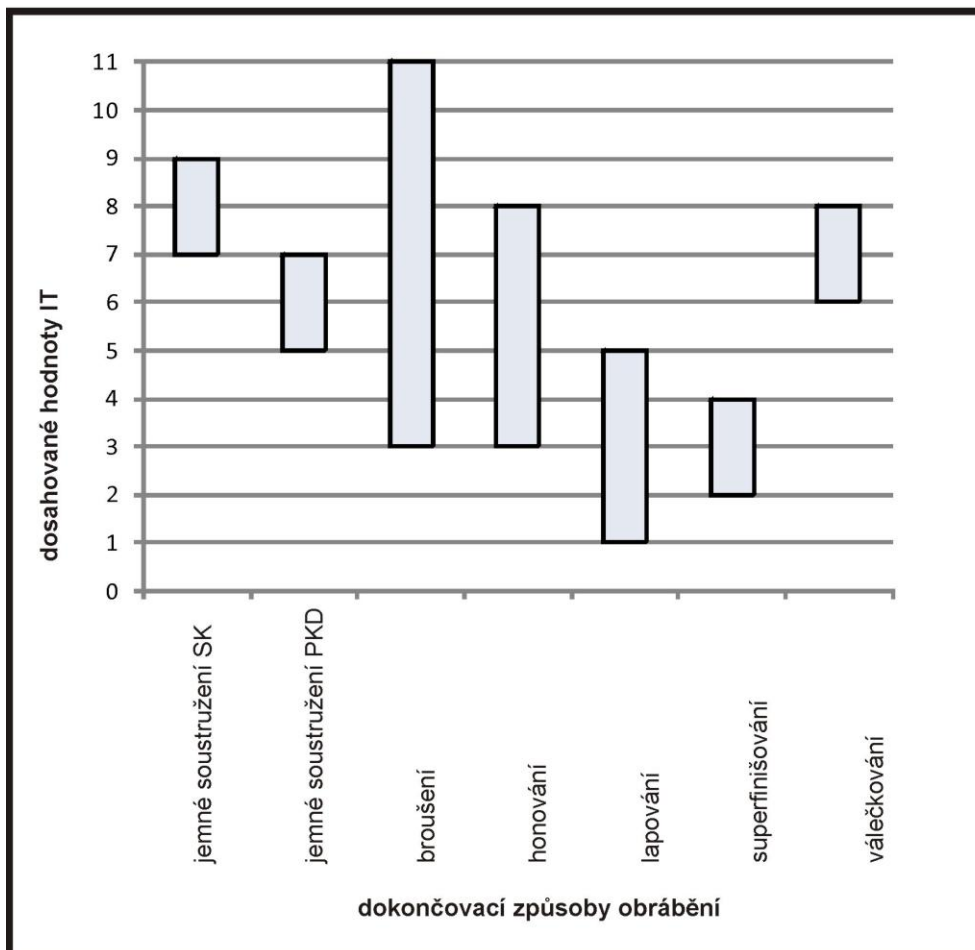
Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3 má hlavní vliv při jemném soustružení na kvalitu drsnosti obrobené plochy poloměr špičky nástroje r_ϵ a posuv f . Výpočet teoretické největší výšky profilu Rz_t a průměrné aritmetické úchylky profilu Ra_t je uveden v kapitole 4.3.1 a 4.3.2.

2.1.1 Srovnání dosahovaných hodnot drsnosti povrchu Ra u dokončovacích způsobů obrábění



Obr. 2.3 Grafické srovnání dosahovaných hodnot drsnosti povrchu Ra u dokončovacích způsobů obrábění

2.1.2 Srovnání dosahovaných hodnot rozměrové přesnosti IT u dokončovacích způsobů obrábění



Obr. 2.4 Grafické srovnání dosahovaných hodnot rozměrové přesnosti IT u dokončovacích způsobů obrábění

2.2 Zbytková napětí

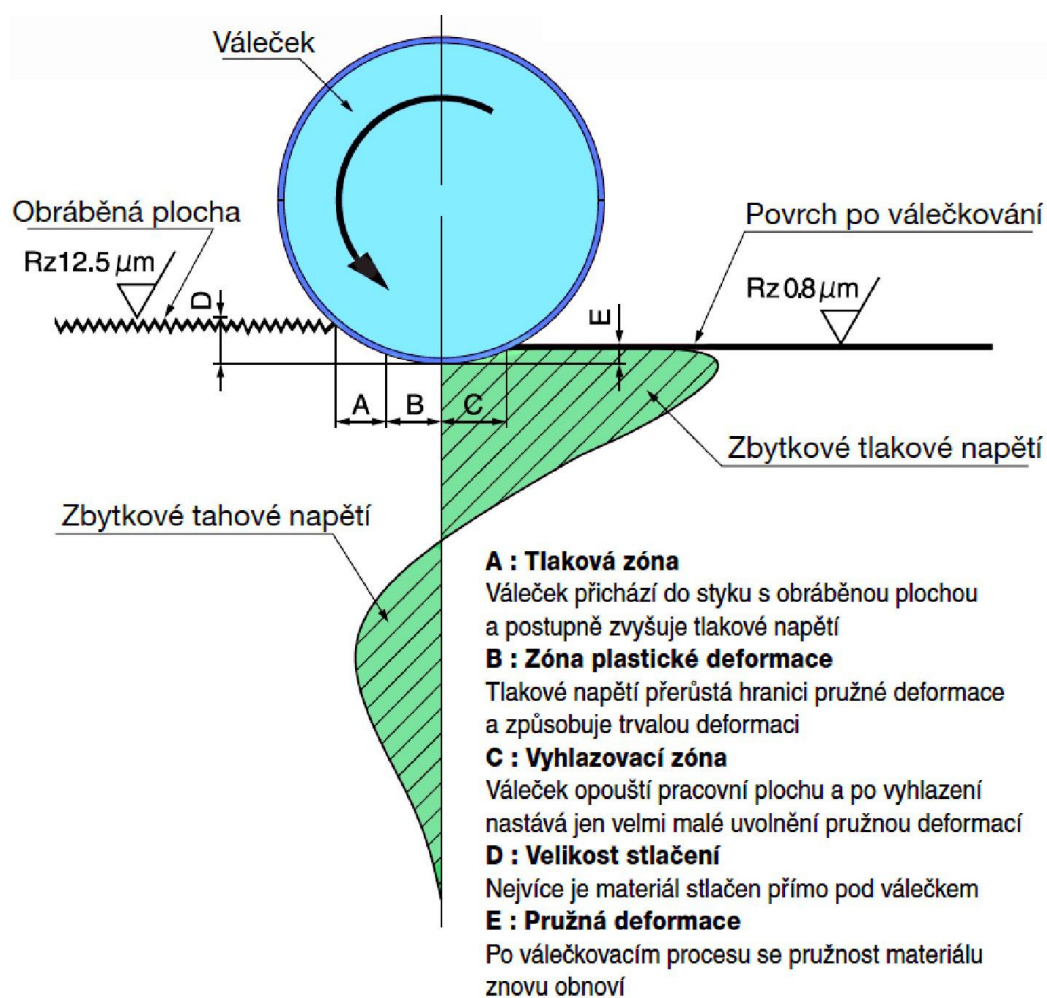
Podmínkou vzniku zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobku je nerovnoměrná plastická deformace. Mezi další mechanismy tvorby zbytkových napětí patří teplotní roztažnost při nerovnoměrném ohřevu nebo ochlazování, strukturní změny materiálu v tuhém stavu a vznikající chemické procesy. U zbytkového napětí záleží na smyslu působení napětí, jestli jde o tahové či tlakové, do jaké hloubky napětí pronikají a jaká je maximální hodnota napětí.^{3, 16}

Zbytková napětí mohou zlepšovat nebo zhoršovat funkčnost součástí (mají vliv na statickou a dynamickou pevnost a odolnost povrchu proti korozi). Tlakové napětí je pro obrobek výhodné (případné zárodky trhlin jsou tlakem zavírány). V naprosté většině případů vzniká, pokud při obrábění převažuje plastická deformace bez výrazného tepelného účinku. Tahové napětí je pro obrobenou součást nevýhodné (může dojít k únavovým lomům). Vzniká při současném tepelném a mechanickém zatěžování povrchu. Horní část povrchové vrstvy je při obrábění nejteplejší a je plasticky zkrácena. Po vychladnutí se ve zkrácené vrstvě vytvoří tahové napětí. Vliv strukturní a chemické změny způsobí buď zvětšení objemu (vzniká tlakové napětí) nebo zmenšení objemu (vzniká tahové napětí).^{3, 16}

Každá technologická operace dosahuje přestavby zbytkových napětí svým vlastním způsobem jen v takovém objemu materiálu, v jakém je schopna vyvolat plastickou deformaci a tepelně jej ovlivnit.²⁰

2.2.2 Zbytková napětí při válečkování

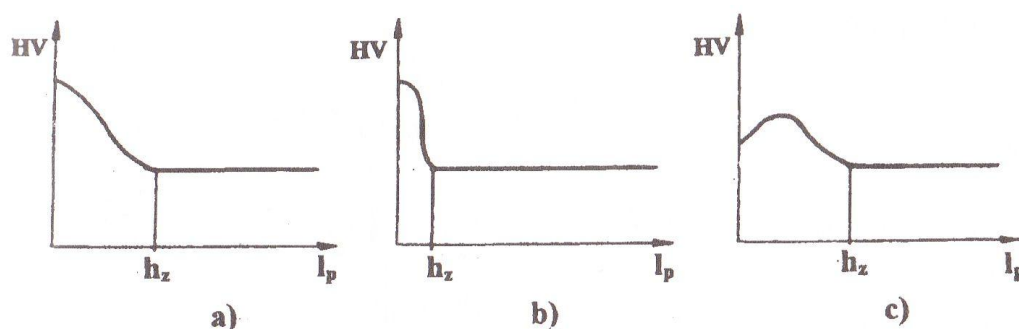
Tlaková napětí na povrchu válečkované plochy zabraňují vzniku koroze, trhlin a eliminují vliv mikrovrubů. Tento příznivý vliv tlakových pnutí se zejména projevuje u střídavě namáhaných součástí s místy koncentrovaného napětí (osazení, zápich apod.).⁸



Obr. 2.6 Vznik a průběh zbytkových napětí při válečkování (21)

2.3 Zpevnění povrchové vrstvy

Zpevnění povrchové vrstvy je způsobeno především tím, že oblast primárních plastických deformací zasahuje pod úroveň budoucího povrchu. Další vliv na zpevnění povrchové vrstvy souvisí se skutečností, že reálné ostří není tvořeno přímkou, ale je určitým způsobem zaoblono. Povrch obrobené součásti nevzniká řezáním, ale tvářením (negativní úhel čela nástroje). Zpevnění povrchové vrstvy lze vyjádřit hodnotou mikrotvrdosti.³



Obr. 2.7 Charakteristické průběhy zpevnění v povrchové vrstvě (3)

HV – mikrotvrdost; l_p – vzdálenost od povrchu; h_z – hloubka zpevněné vrstvy

Na obr. 2.7 jsou znázorněny typické průběhy mikrotvrdosti na vzdálenosti od povrchu. V případě obr. 2.7a je dosaženo největší mikrotvrdosti HV na povrchu obrobku, potom průběh pozvolna klesá. Hloubka zpevněné vrstvy h_z je relativně velká. Toto je výhodný průběh z hlediska funkčních vlastností povrchu součásti. Na obr. 2.7b je také povrchová tvrdost vysoká, ale průběh křivky prudce klesá, hloubka h_z není dost velká. Při takovém průběhu dochází k odlupování povrchové vrstvy. Průběh na obr. 2.7 c znázorňuje povrch, u kterého proběhla plastická deformace, kde plasticita materiálu byla plně vyčerpána. Další silové působení mělo za následek vznik trhlin na povrchu. Toto se promítá do poklesu tvrdosti. Tvrdost může být dokonce nižší než původní tvrdost materiálu.³

3. EXPERIMENT

Firma CIE Ždánice, s.r.o. se sídlem ve Ždánicích je členem španělské korporace CIE Automotive. Společnost je plně vlastněna společností CIE AZKOITIA, S. L.

Předmětem podnikání společnosti je výroba kovového spotřebního zboží pro automobilový průmysl. Jednou z částí výrobního programu je výroba primárního pístu brzdového válce. U této součásti je zapotřebí dosažení kvalitního povrchu válcové plochy o požadované průměrné aritmetické úchylce $R_a=0,4 \mu\text{m}$. Této hodnoty má být dosaženo na soustružnickém centru pomocí břitových destiček z nepovlakovaného slinutého karbidu o poloměru špičky nástroje $r_\epsilon=0,2$ a $0,4 \text{ mm}$ nebo polykrystalického diamantu o $r_\epsilon=0,4 \text{ mm}$.

3.1 Metodika experimentu

3.1.1 Zkušební součást

Počet zkušebních součástí: 90 ks (10 ks na jeden nástroj o daných řezných podmínkách)

Materiál součásti: Hliníková tvárná slitina – TS2-17-027 (s maximálním obsahem křemíku 1,4 %)

Celkové rozměry: $\varnothing 25,3085\text{-}73,5 \text{ mm}$



Obr. 3.1 Zkušební součást – píst primárního brzdového válce

3.1.2 Obráběcí stroj

Celý proces dokončovacího obrábění byl proveden na soustružnickém centru Index ABC.



Obr. 3.2 Soustružnické centrum Index ABC

TECHNICKÉ ÚDAJE:

Max. délka soustružení: [mm] 250

Průměr soustružení: [mm] 36

Max. otáčky: [1/min.] 7.000

Výkon pohonu: [kW] 20/29

Točivý moment: [Nm] 95/140

Osa C

Protilehlé vřeteno

Pojezdové dráhy: Osa X: [mm] X1:90 X2:80 Osa Z: [mm] X1:280 X2:80

Rychloposuv: (X/Z) [m/min.] 16/24

Počet revolverových hlav: 2 poháněné nástroje

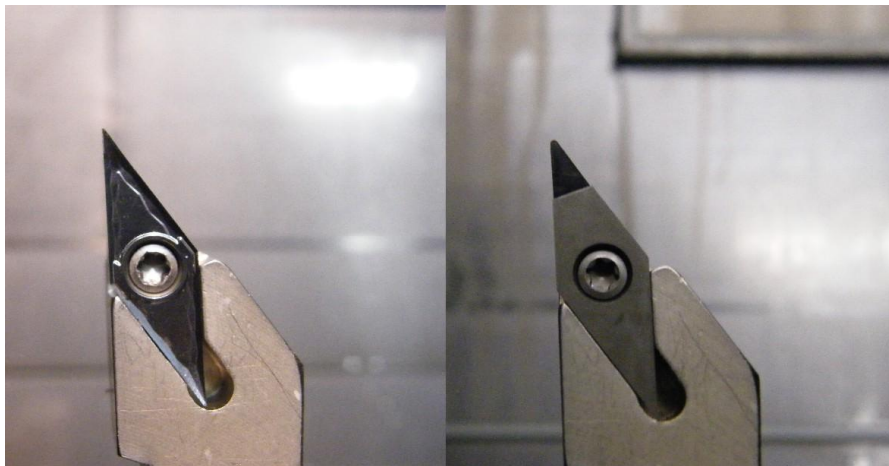
3.1.3 Nástroj

Označení břitové destičky z PKD (r_ϵ 0,4 mm): VCMT 160404 PKD

Označení břitové destičky z SK (r_ϵ 0,2 mm):: VCGT 160402 ASIC20

Označení břitové destičky z SK (r_ϵ 0,4 mm):: VCGT 160404 ASIC20

Označení držáku břitové destičky: SVJCR 2020K-16



Obr. 3.3 Soustružnický nůž s vyměnitelnou destičkou (vlevo destička z SK, vpravo z PKD)

3.1.4 Řezné podmínky

Pro destičky z SK (slinutý karbid)

Otáčky: $n = 2810 \text{ min}^{-1}$

Posuv: $f = 0,02, 0,036, 0,05 \text{ mm.ot}^{-1}$

Řezná rychlost: $v_c = 150 \text{ m.min}^{-1}$

Pro destičky z PKD (polykrystalický diamant)

Otáčky: $n = 2810 \text{ min}^{-1}$

Posuv: $f = 0,06, 0,08, 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$

Řezná rychlost: $v_c = 150 \text{ m.min}^{-1}$

Výpočet řezné rychlosti v_c (3):

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.1)$$

Kde: D ... průměr obráběné plochy [mm],
 n ... otáčky obrobku [min^{-1}],
 f ... posuv na otáčku obrobku [mm].

Při dokončovacím procesu obráběné součásti, která je ze slitiny hliníku s minimálním obsahem křemíku (max. 1,4%), dochází při vysokých řezných rychlostech na konci součásti k jejímu rozechvění, což má za následek zhoršení jakosti obrobene plochy. Na obr. 3.4 je znázorněna součást obráběná řeznou rychlostí $v_c = 300 \text{ m.min}^{-1}$ pomocí břitové destičky z polykrystalického diamantu. Proto i přes mnohonásobně vyšší doporučené řezné rychlosti u destiček z PKD a SK musí být použito nižších hodnot.

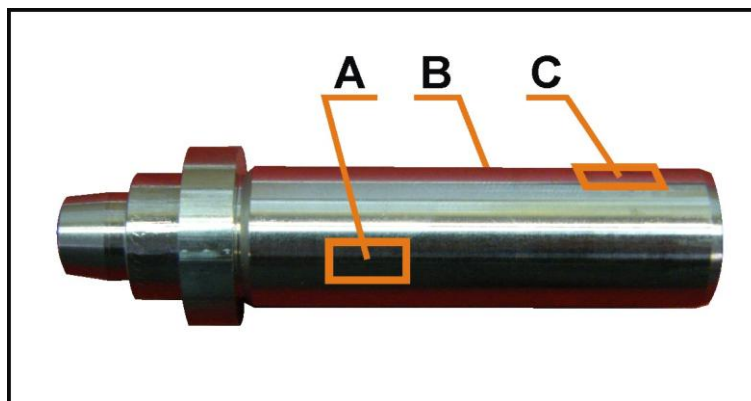


Obr. 3.4 Součást obrobena břitovou destičkou z PKD při $v_c = 300 \text{ m.min}^{-1}$

3.1.5 Metodika měření

Experiment pro dokončovací obrábění byl proveden na součásti píst ze slitiny hliníku (viz příloha 1). Obrábění bylo provedeno na soustružnickém centru Index ABC za použití různých tipů břitových destiček. A to destičky z SK o poloměru špičky nástroje 0,2 a 0,4 mm a destičky z polykrystalického diamantu PKD o poloměru špičky nástroje 0,4 mm. Vždy po obrobení deseti zkušebních vzorků byl změněn posuv – f . Pro každou břitovou destičku byly nastaveny tři hodnoty posuvu.

U každého vzorku byly naměřeny pomocí digitálního drsnoměru tři hodnoty průměrné aritmetické úchyly - R_a a největší výšky profilu – R_z . Tyto hodnoty byly odečítány z různých částí válcové plochy, aby nedošlo ke zkreslení naměřených výsledků (viz obr. 3.5).



Obr. 3.5 Označení místa měřeného drsnoměrem

Drsnoměr Mitutoyo SurfTest – 301

Technické parametry:

Zdvih snímače (rozsah osy z): 350 μm ,

Posuv (rozsah osy x): 0,25mm; 0,8mm; 2,5mm, 8mm,

Měřené délky nastavitelné od 1 do 5,

Měřené parametry: R_a , R_q , R_y , R_z , R_{3z} , R_t , R_p , t_p , P_c



Obr. 3.6 Drsnoměr Mitutoyo SurfTest - 301

3.2 Naměřené hodnoty

Tab.3.1 Naměřené hodnoty pro nástroj z SK o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm

i	f=0,02 mm/ot		f=0,036 mm/ot		f=0,05 mm/ot	
	Ra _i [μm]	Rz _i [μm]	Ra _i [μm]	Rz _i [μm]	Ra _i [μm]	Rz _i [μm]
1	0,39	2,03	0,40	2,27	0,41	2,20
2	0,41	2,47	0,33	1,87	0,34	2,00
3	0,30	1,67	0,31	1,77	0,33	2,17
4	0,34	1,97	0,33	1,93	0,38	2,27
5	0,38	2,30	0,39	2,17	0,40	2,40
6	0,41	2,27	0,36	2,13	0,39	2,30
7	0,30	1,80	0,36	1,90	0,48	3,00
8	0,37	2,07	0,35	2,00	0,48	2,87
9	0,34	2,27	0,33	1,93	0,42	2,43
10	0,36	2,07	0,33	1,87	0,34	2,10

Tab.3.2 Naměřené hodnoty pro nástroj z SK o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,4$ mm

i	f=0,02 mm/ot		f=0,036 mm/ot		f=0,05 mm/ot	
	Ra _i [μm]	Rz _i [μm]	Ra _i [μm]	Rz _i [μm]	Ra _i [μm]	Rz _i [μm]
1	0,34	2,20	0,38	1,90	0,78	3,83
2	0,37	2,37	0,42	2,37	0,61	2,90
3	0,45	2,87	0,46	2,47	0,61	3,17
4	0,42	2,73	0,43	2,37	0,60	2,93
5	0,46	3,03	0,43	2,47	0,66	3,57
6	0,46	2,77	0,46	2,60	0,62	3,03
7	0,40	2,53	0,48	2,53	0,59	2,90
8	0,44	2,57	0,49	2,70	0,64	3,33
9	0,43	2,80	0,50	2,73	0,61	3,10
10	0,45	2,67	0,51	2,67	0,61	3,00

Tab.3.3 Naměřené hodnoty pro nástroj z PKD o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,4 \text{ mm}$

	f=0,06 mm/ot		f=0,08 mm/ot		f=0,1 mm/ot	
i	Ra_i [μm]	Rz_i [μm]	Ra_i [μm]	Rz_i [μm]	Ra_i [μm]	Rz_i [μm]
1	0,34	1,70	0,45	2,63	0,65	3,57
2	0,30	1,63	0,42	2,63	0,63	3,20
3	0,33	1,97	0,45	2,63	0,66	3,27
4	0,32	1,90	0,42	2,57	0,63	3,27
5	0,32	1,77	0,48	2,70	0,62	3,03
6	0,33	1,70	0,43	2,67	0,64	3,33
7	0,39	1,93	0,41	2,33	0,63	3,20
8	0,35	1,97	0,46	2,43	0,62	3,07
9	0,37	2,13	0,47	2,77	0,66	3,13
10	0,33	1,87	0,44	2,50	0,66	3,30

3.3 Srovnání naměřených hodnot s teoretickými hodnotami průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_t a největší výšky profilu Rz_t

3.3.1 Teoretická hodnota průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_t

Předpoklad pro výpočet Ra_t : struktura povrchu je realizována jako reprodukce obloukové části špičky nástroje.

Teoretická hodnota průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_t (12):

$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot r_\varepsilon^2 (2\alpha_A - \sin 2\alpha_A)}{f} [\mu m] \quad (3.2)$$

$$\alpha_A = \arccos \left[\frac{r_\varepsilon}{f} \left(\arcsin \frac{f}{2r_\varepsilon} + \frac{f}{4r_\varepsilon^2} \sqrt{4r_\varepsilon^2 - f^2} \right) \right] [rad] \quad (3.3)$$

Kde: r_ε ... poloměr špičky [mm],
 f ... posuv na otáčku [mm].

3.3.2 Teoretická hodnota nejvyšší výšky profilu Rz_t

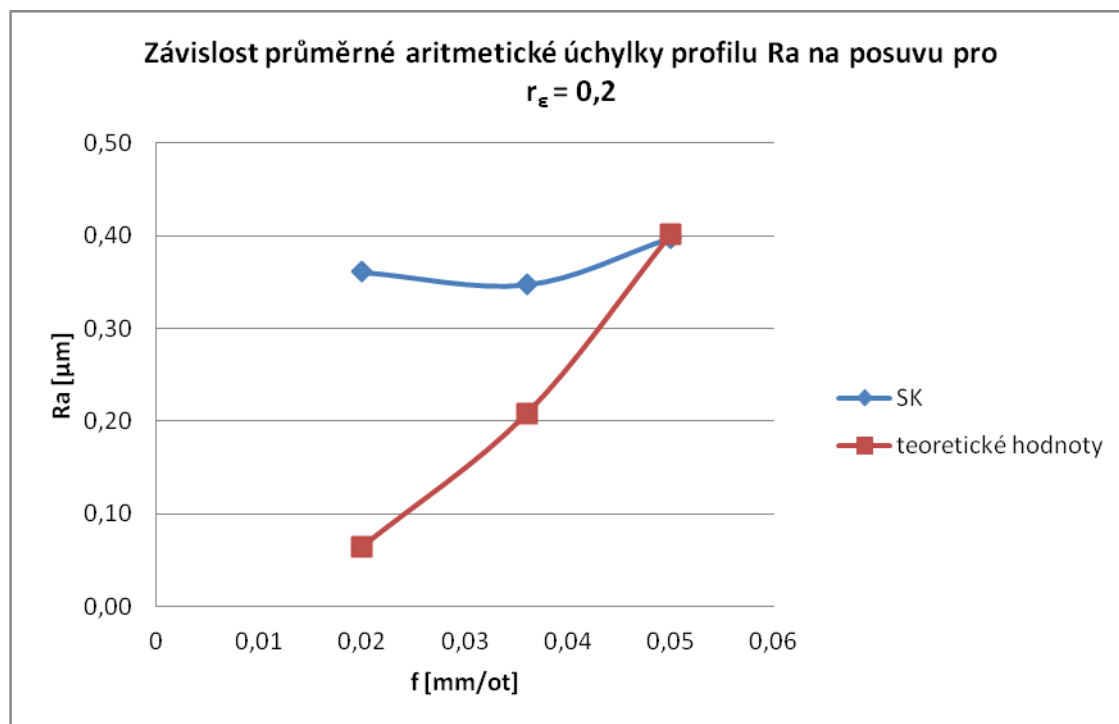
Předpoklad pro výpočet Rat : struktura povrchu je realizována jako reprodukce obloukové části špičky nástroje.

Teoretická hodnota nejvyšší výšky profilu Rz_t (12):

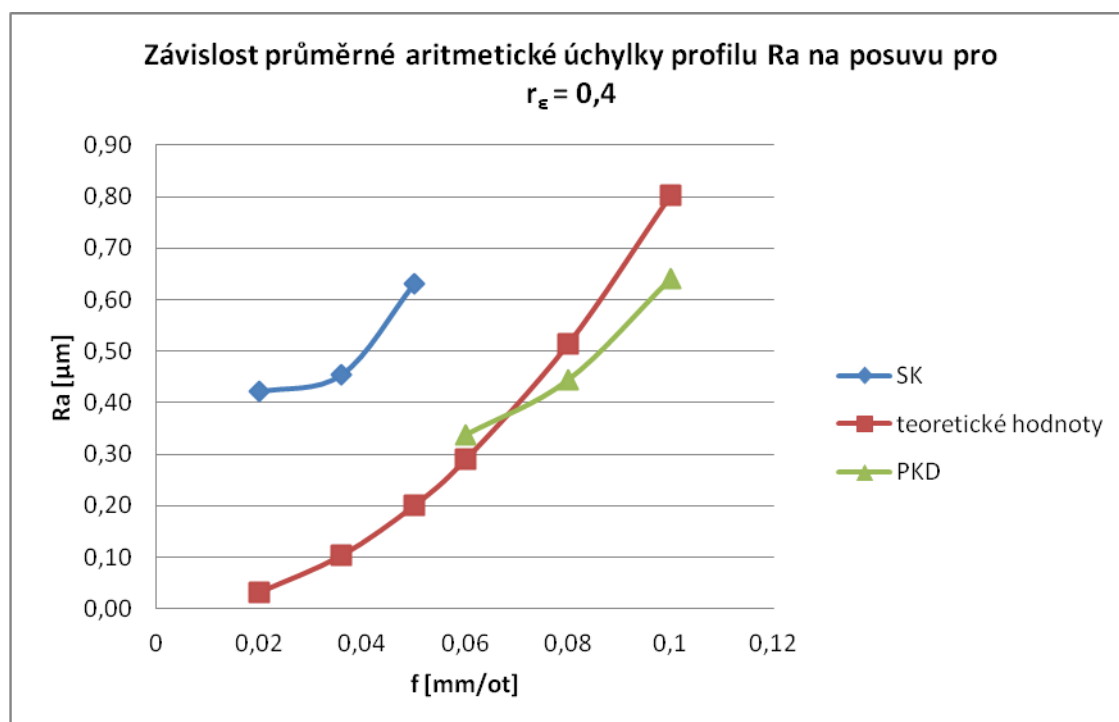
$$Rz_t = f(r_\varepsilon, f) = (r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - 0,25 \cdot f^2}) \cdot 10^3 [\mu m] \quad (3.4)$$

Kde: r_ε ... poloměr špičky [mm],
 f ... posuv na otáčku [mm].

3.3.3 Srovnání naměřených hodnot R_a s teoretickými hodnotami průměrné aritmetické úchyly profilu R_{a_t}

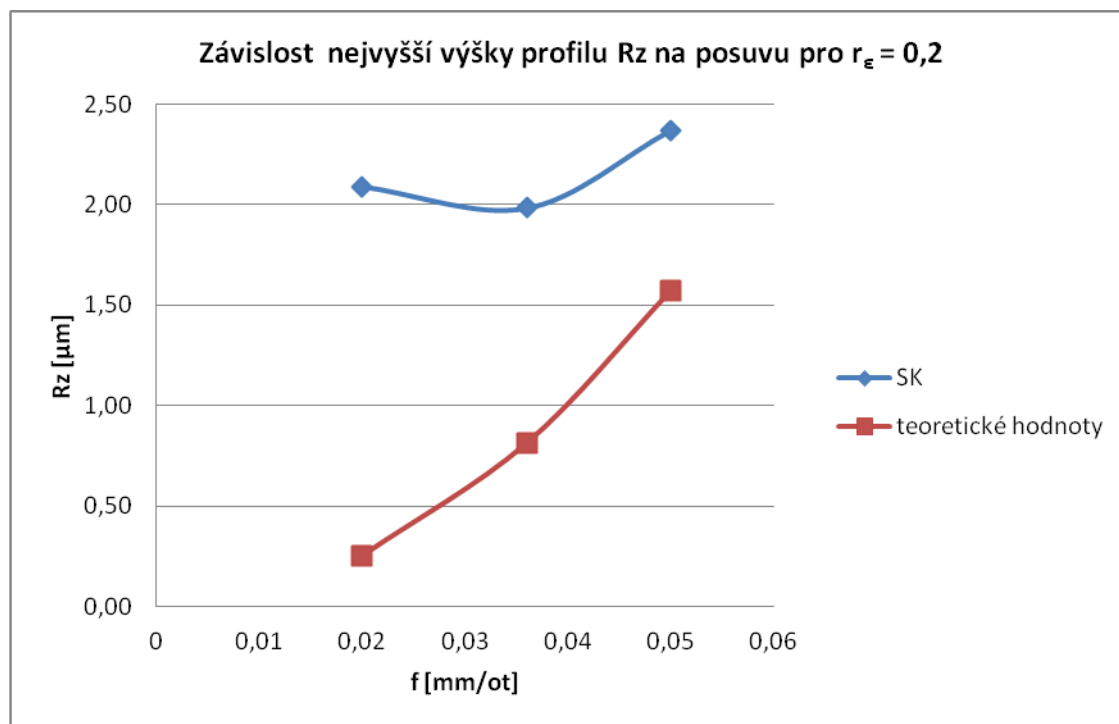


Obr. 3.7 Srovnání naměřených hodnot R_a s teoretickými hodnotami průměrné aritmetické úchyly profilu R_{a_t} pro $r_\epsilon=0,2\text{mm}$

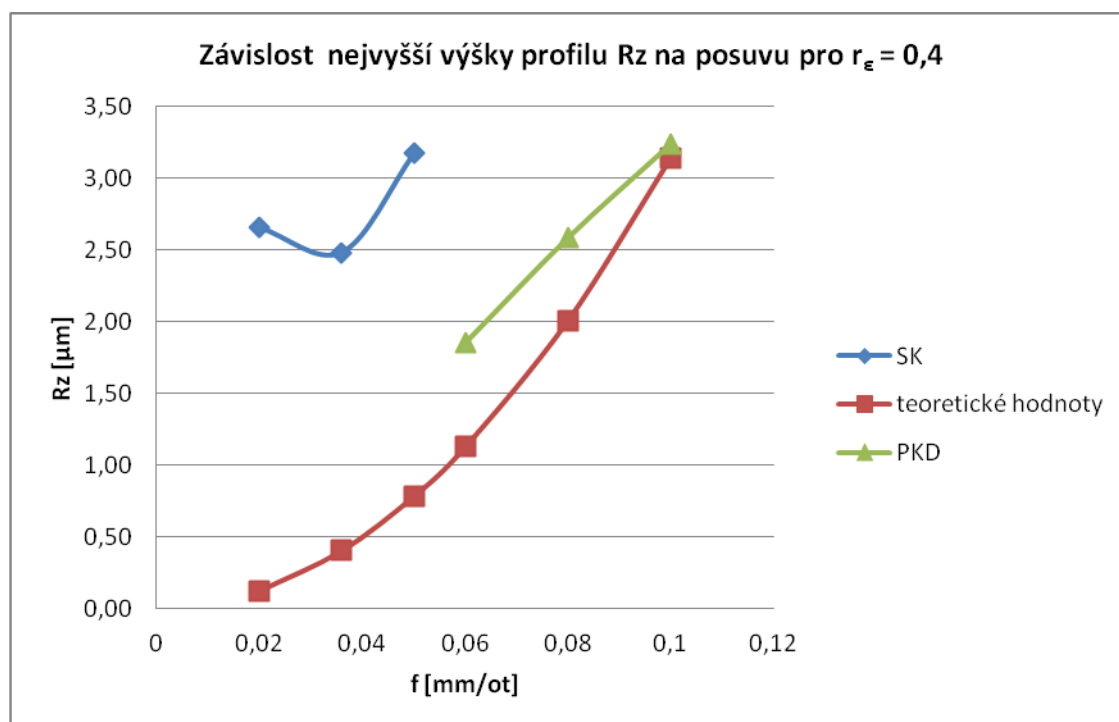


Obr. 3.8 Srovnání naměřených hodnot R_a s teoretickými hodnotami průměrné aritmetické úchyly profilu R_{a_t} pro $r_\epsilon=0,4\text{mm}$

3.3.4 Srovnání naměřených hodnot R_z s teoretickými hodnotami nejvyšší výšky profilu R_{z_t}



Obr. 3.9 Srovnání naměřených hodnot R_z s teoretickými hodnotami nejvyšší výšky profilu R_{z_t} pro $r_\epsilon=0,2\text{mm}$



Obr. 3.10 Srovnání naměřených hodnot R_z s teoretickými hodnotami nejvyšší výšky profilu R_{z_t} pro $r_\epsilon=0,4\text{mm}$

3.4 Obecné vztahy statistické interpretace

Odhad střední hodnoty parametru přesnosti obrobené plochy (4):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.5)$$

Odhad směrodatné odchylky parametru přesnosti obrobené plochy (4):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.6)$$

Výpočet jednostranného konfidenčního intervalu střední hodnoty parametru přesnosti obrobené plochy (4):

$$m_{H1} = \bar{x} + t_{1-\alpha/2;n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.7)$$

Výpočet jednostranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy (4):

$$L_{s1} = \bar{x} + k_1 \cdot s \quad (3.8)$$

3.5 Statistická interpretace naměřených hodnot

3.5.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra

Odhad střední hodnoty parametru přesnosti povrchu \overline{Ra} – destička z SK o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm, posuv $f = 0,02$ mm/ot:

$$\overline{Ra} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ra_i = 0,36 \mu m$$

Odhad směrodatné odchylky parametru přesnosti povrchu s_{Ra} – destička z SK o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm, posuv $f = 0,02$ mm/ot:

$$s_{Ra} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})^2} = 0,039 \mu m$$

Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty; horní mez; konfidenční úroveň $1-\alpha=0,95$:

$$t_{1-\alpha/2;n-1} = 2,262$$

Horní konfidenční mez m_{H1Ra} – destička z SK o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm, posuv $f = 0,02$ mm/ot:

$$m_{H1Ra} = \overline{Ra} + t_{1-\alpha/2;n-1} \frac{s_{Ra}}{\sqrt{n}} = 0,389 \mu m$$

Jednostranný statistický interval; horní mez; konfidenční úroveň $1-\alpha=0,95$; podíl souboru $p=0,95$:

$$k_1 = 2,91$$

Horní mez statistického tolerančního intervalu L_{s1Ra} – destička z SK o poloměru špičky $r_\xi = 0,2$ mm, posuv $f = 0,02$ mm/ot:

$$L_{s1Ra} = \overline{Ra} + k \cdot s_{Ra} = 0,476 \mu m$$

Tab.3.4 Vypočítané hodnoty pro destičku z SK, $r_\epsilon = 0,2$ mm

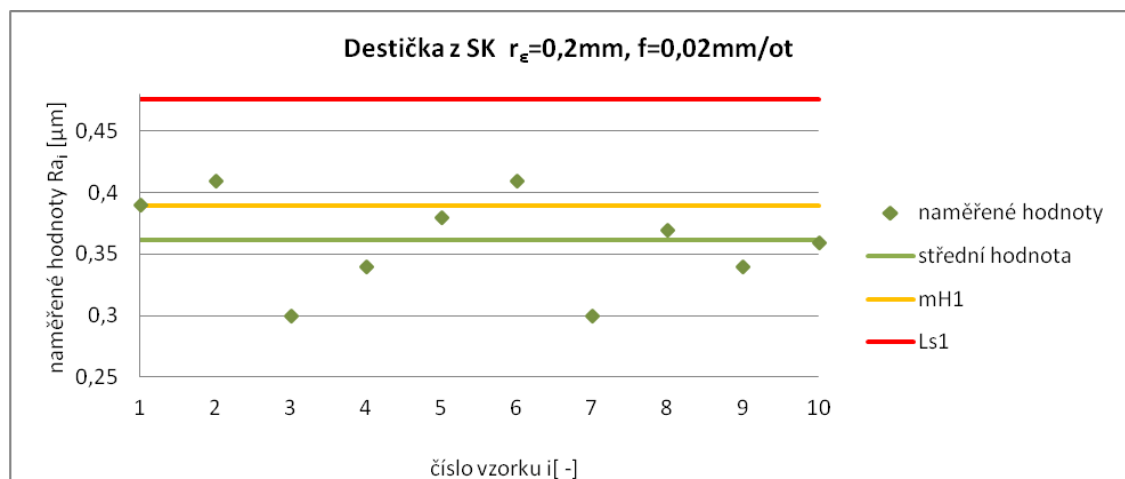
	f = 0,02 mm/ot	f = 0,036 mm/ot	f = 0,05 mm/ot
\overline{Ra} [μm]	0,36	0,35	0,39
s_{Ra} [μm]	0,039	0,029	0,064
$t_{1-\alpha/2;n-1}$	2,262	2,262	2,262
m_{H1} [μm]	0,389	0,368	0,437
k_1	2,91	2,91	2,91
L_{s1} [μm]	0,476	0,432	0,579

Tab.3.5 Vypočítané hodnoty pro destičku z SK, $r_\epsilon = 0,4$ mm

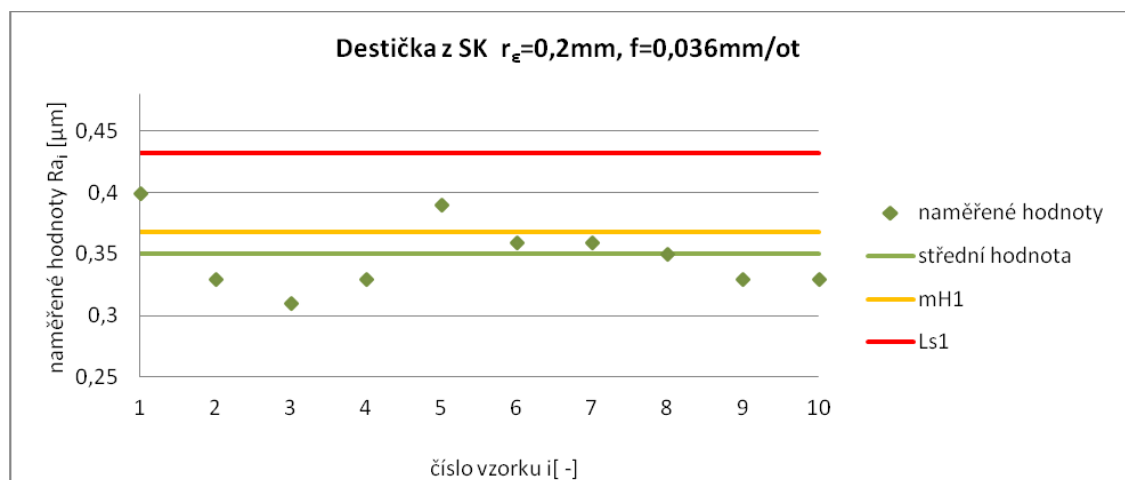
	f = 0,02 mm/ot	f = 0,036 mm/ot	f = 0,05 mm/ot
\overline{Ra} [μm]	0,42	0,46	0,63
s_{Ra} [μm]	0,039	0,040	0,057
$t_{1-\alpha/2;n-1}$	2,262	2,262	2,262
m_{H1} [μm]	0,450	0,485	0,673
k_1	2,91	2,91	2,91
L_{s1} [μm]	0,534	0,573	0,797

Tab.3.6 Vypočítané hodnoty pro destičku z PKD, $r_\epsilon = 0,4$ mm

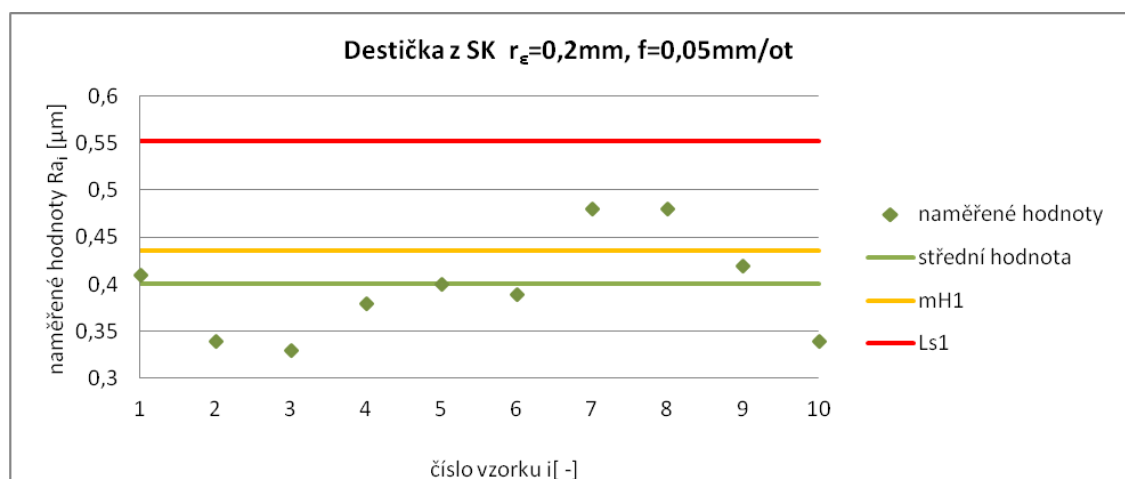
	f = 0,06 mm/ot	f = 0,036 mm/ot	f = 0,05 mm/ot
\overline{Ra} [μm]	0,34	0,44	0,64
s_{Ra} [μm]	0,026	0,024	0,017
$t_{1-\alpha/2;n-1}$ [-]	2,262	2,262	2,262
m_{H1} [μm]	0,356	0,461	0,652
k_1 [-]	2,91	2,91	2,91
L_{s1} [μm]	0,413	0,514	0,689



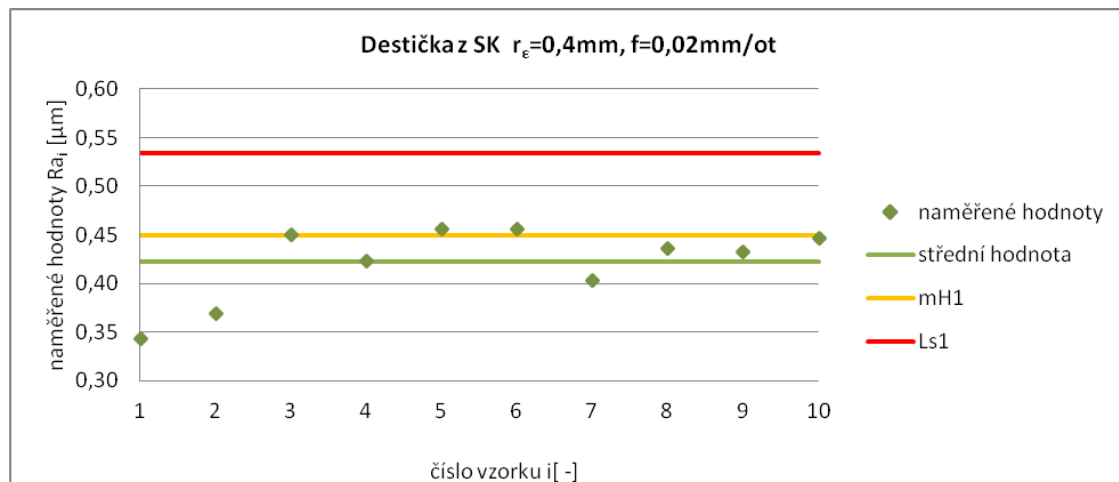
Obr. 3.11 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,2\text{mm}$, $f=0,02\text{mm/ot}$



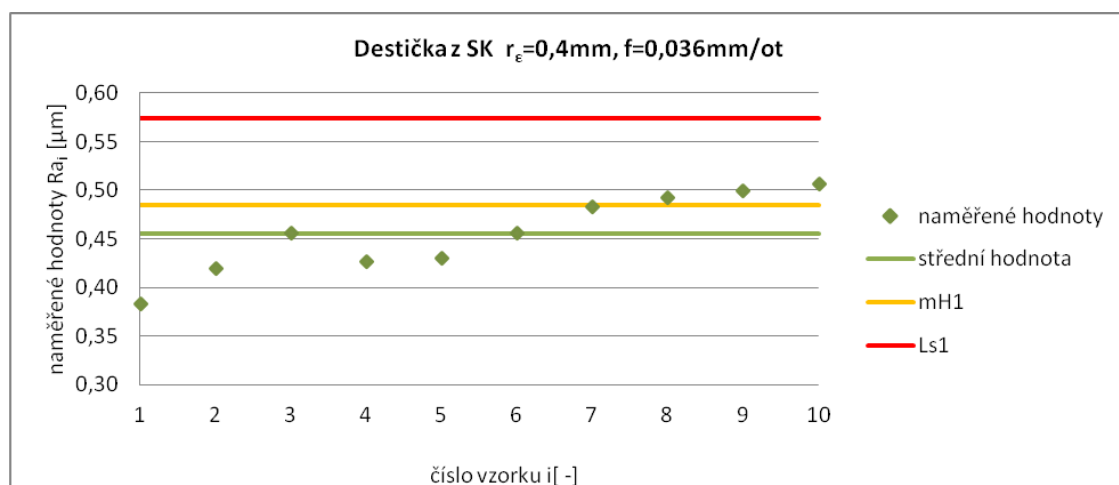
Obr. 3.12 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,2\text{mm}$, $f=0,036\text{mm/ot}$



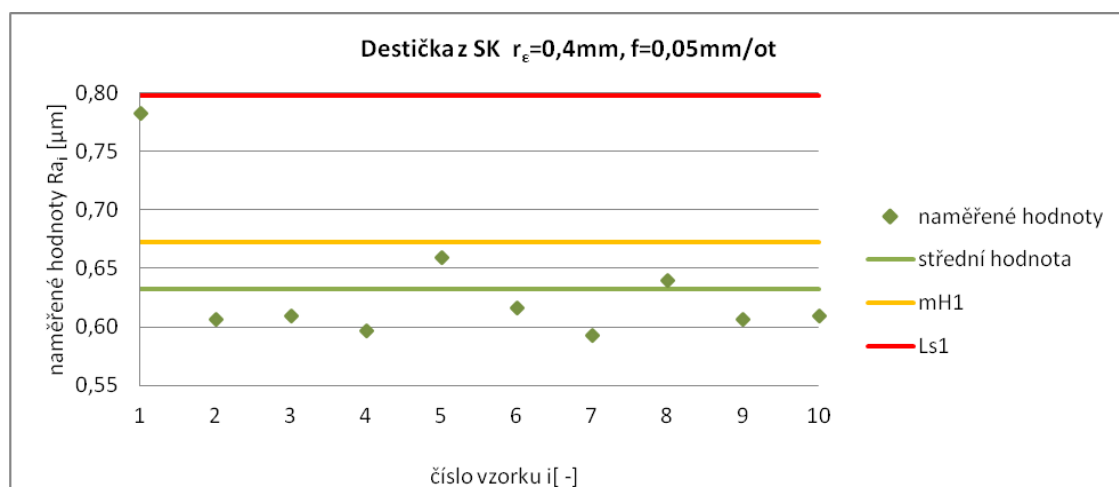
Obr. 3.13 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,2\text{mm}$, $f=0,05\text{mm/ot}$



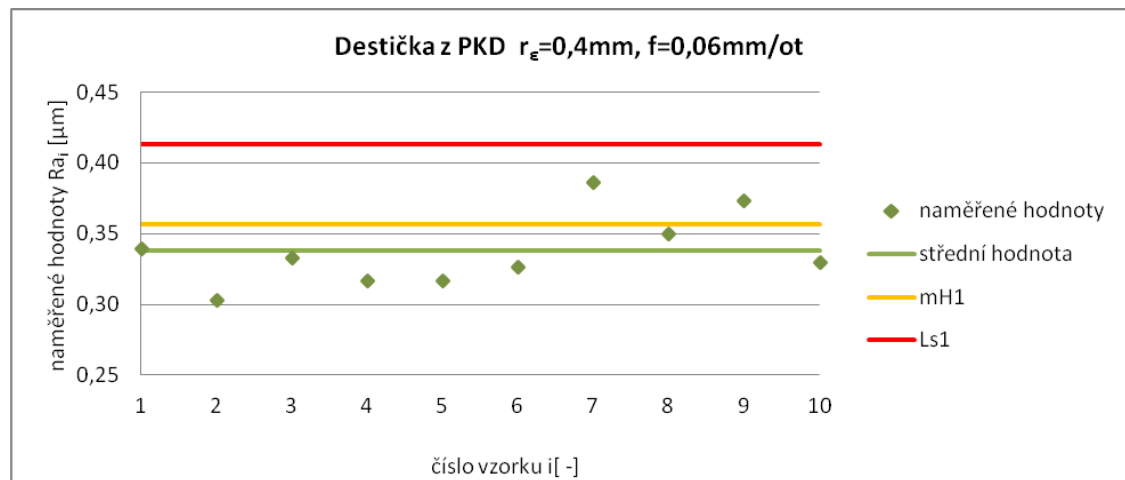
Obr. 3.14 Průměrné aritmetické úchytky profilu Ra_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,02\text{mm/ot}$



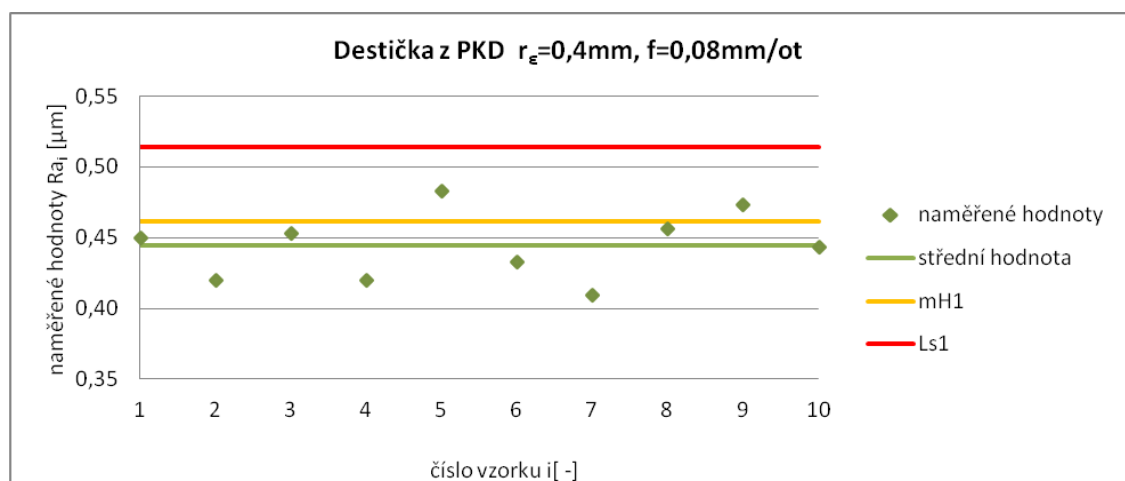
Obr. 3.15 Průměrné aritmetické úchytky profilu Ra_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,036\text{mm/ot}$



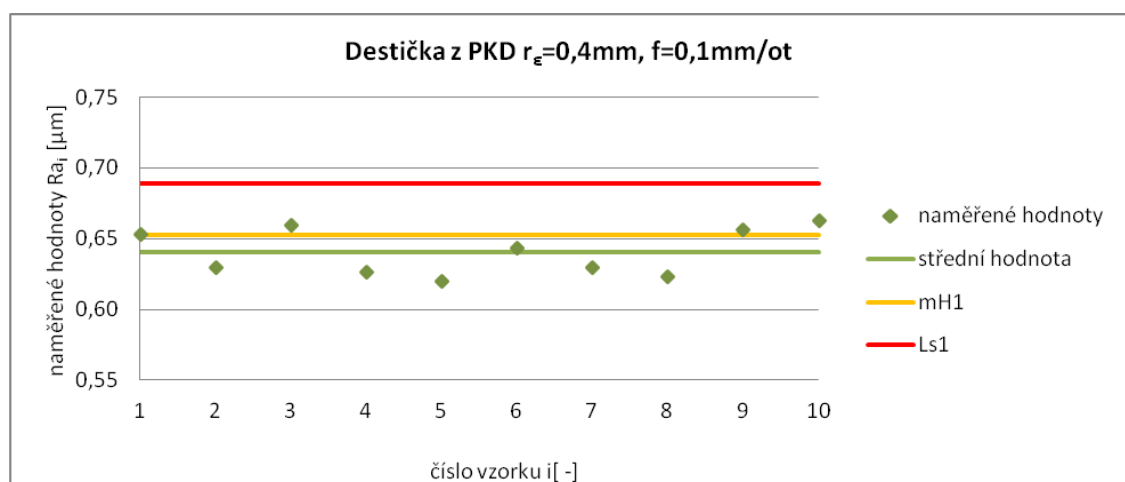
Obr. 3.16 Průměrné aritmetické úchytky profilu Ra_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,05\text{mm/ot}$



Obr. 3.17 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z PKD o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,06\text{mm/ot}$



Obr. 3.18 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z PKD o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,08\text{mm/ot}$



Obr. 3.19 Průměrné aritmetické úchyly profilu Ra_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z PKD o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,1\text{mm/ot}$

3.5.2 Nejvyšší výška profilu Rz

Odhad střední hodnoty parametru přesnosti povrchu \overline{Rz} – destička z SK o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm, posuv $f = 0,02$ mm/ot:

$$\overline{Rz} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Rz_i = 2,09 \mu m$$

Odhad směrodatné odchylky parametru přesnosti povrchu s_{Rz} – destička z SK o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm, posuv $f = 0,02$ mm/ot:

$$s_{Rz} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Rz_i - \overline{Rz})^2} = 0,243 \mu m$$

Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty; horní mez; konfidenční úroveň $1-\alpha=0,95$:

$$t_{1-\alpha/2; n-1} = 2,262$$

Horní konfidenční mez m_{H1} – destička z SK o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm, posuv $f = 0,02$ mm/ot:

$$m_{H1Rz} = \overline{Rz} + t_{1-\alpha/2; n-1} \frac{s_{Rz}}{\sqrt{n}} = 2,264 \mu m$$

Jednostranný statistický interval; horní mez; konfidenční úroveň $1-\alpha=0,95$; podíl souboru $p=0,95$:

$$k_1 = 2,91$$

Horní mez statistického tolerančního intervalu L_{s1Rz} – destička z SK o poloměru špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm, posuv $f = 0,02$ mm/ot:

$$L_{s1Rz} = \overline{Rz} + k \cdot s_{Rz} = 2,797 \mu m$$

Tab.3.4 Vypočítané hodnoty pro destičku z SK, $r_\epsilon = 0,2$ mm

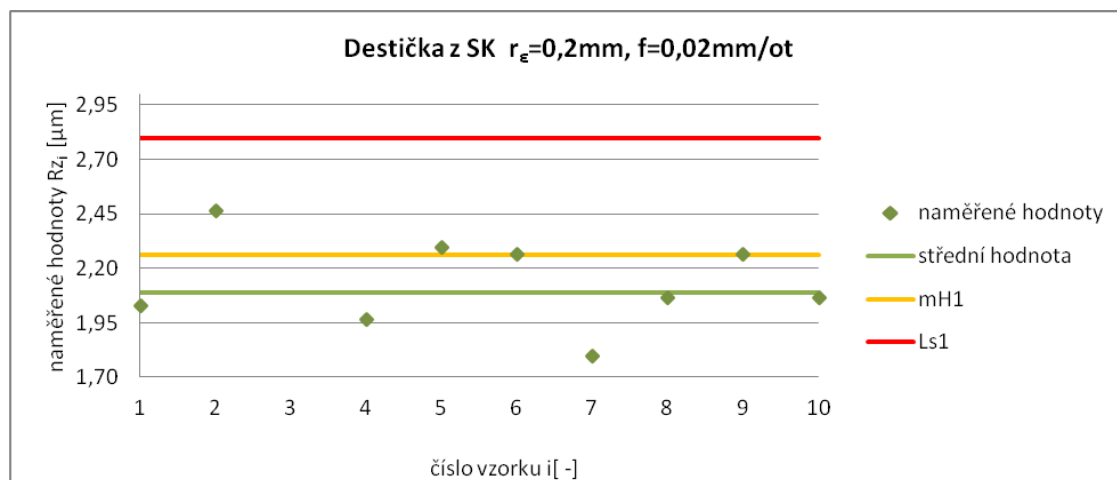
	f = 0,02 mm/ot	f = 0,036 mm/ot	f = 0,05 mm/ot
$\overline{R_z}$ [μm]	2,09	1,98	2,37
s_{Rz} [μm]	0,243	0,157	0,333
$t_{1-\alpha/2;n-1}$	2,262	2,262	2,262
m_{H1} [μm]	2,264	2,096	2,605
k_1	2,91	2,91	2,91
L_{s1} [μm]	2,797	2,441	3,336

Tab.3.5 Vypočítané hodnoty pro destičku z SK, $r_\epsilon = 0,4$ mm

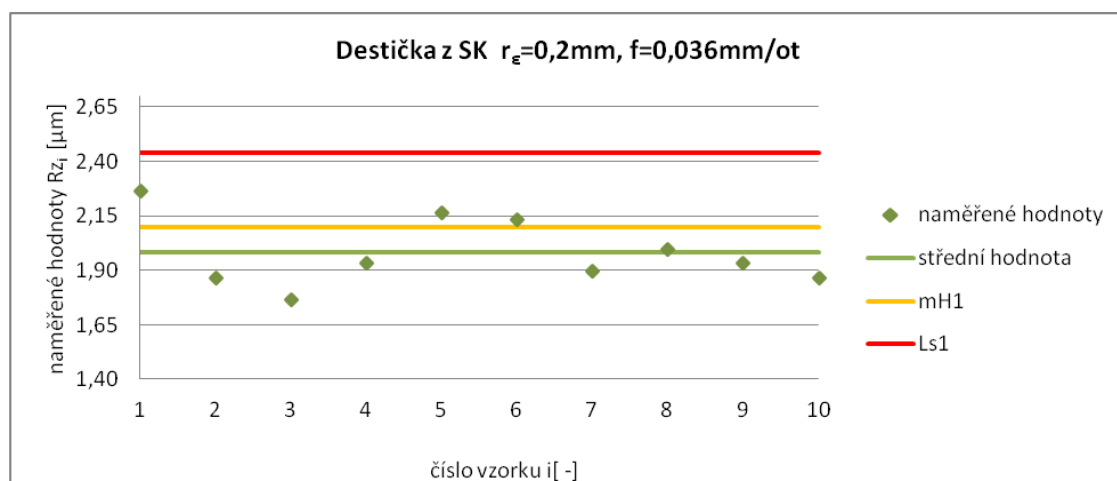
	f = 0,02 mm/ot	f = 0,036 mm/ot	f = 0,05 mm/ot
$\overline{R_z}$ [μm]	2,65	2,48	3,18
s_{Rz} [μm]	0,245	0,242	0,312
$t_{1-\alpha/2;n-1}$	2,262	2,262	2,262
m_{H1} [μm]	2,829	2,653	3,400
k_1	2,91	2,91	2,91
L_{s1} [μm]	3,366	3,184	4,086

Tab.3.6 Vypočítané hodnoty pro destičku z PKD, $r_\epsilon = 0,4$ mm

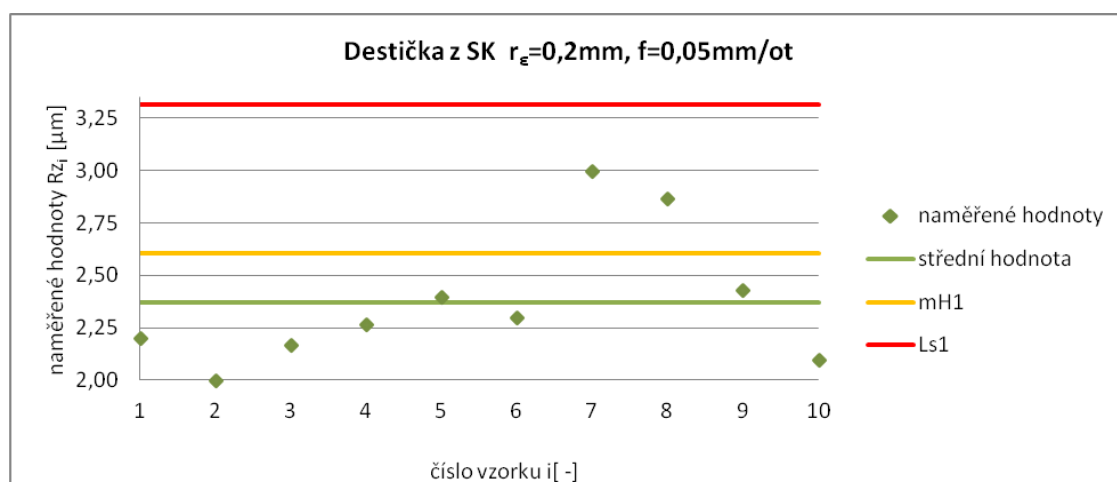
	f = 0,06 mm/ot	f = 0,08 mm/ot	f = 0,1 mm/ot
$\overline{R_z}$ [μm]	1,86	2,59	3,24
s_{Rz} [μm]	0,155	0,131	0,152
$t_{1-\alpha/2;n-1}$	2,262	2,262	2,262
m_{H1} [μm]	1,967	2,680	3,345
k_1	2,91	2,91	2,91
L_{s1} [μm]	2,307	2,967	3,679



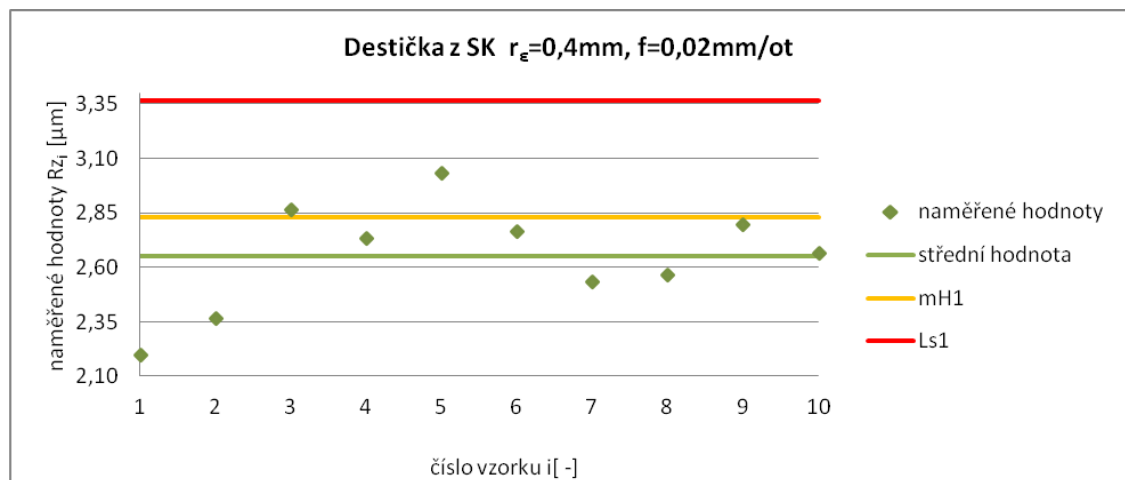
Obr. 3.20 Nejvyšší výška profilu Rz_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,2\text{mm}$, $f=0,02\text{mm/ot}$



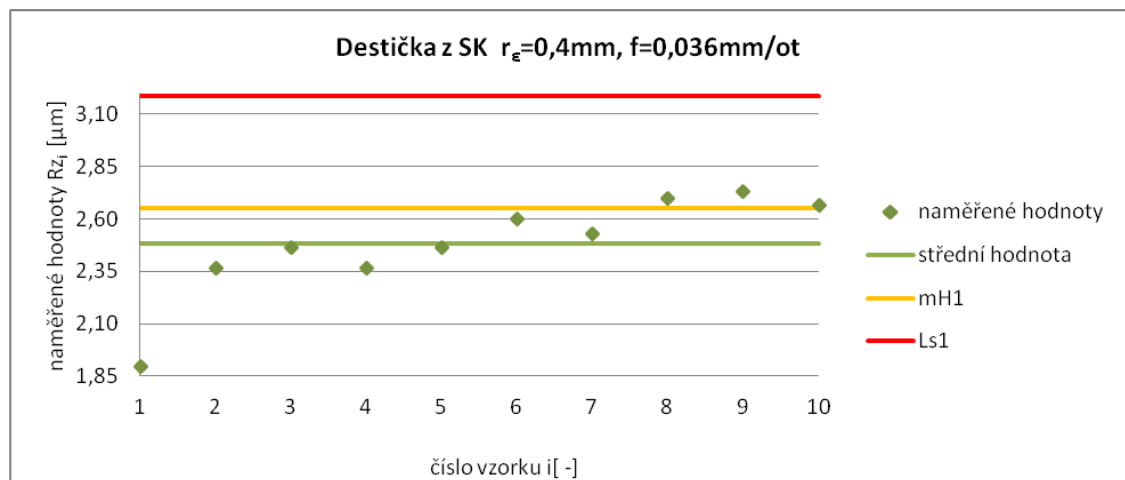
Obr. 3.21 Nejvyšší výška profilu Rz_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,2\text{mm}$, $f=0,036\text{mm/ot}$



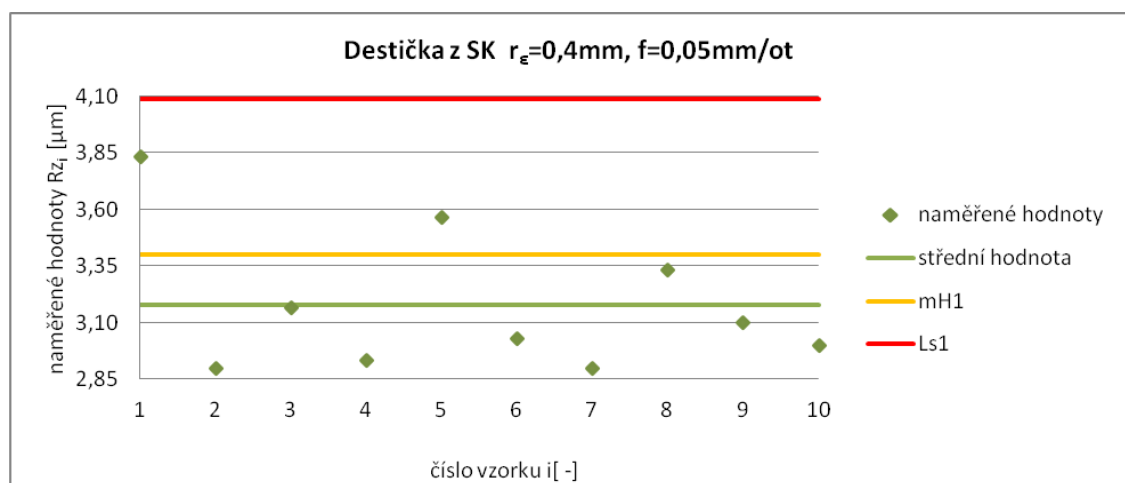
Obr. 3.22 Nejvyšší výška profilu Rz_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,2\text{mm}$, $f=0,05\text{mm/ot}$



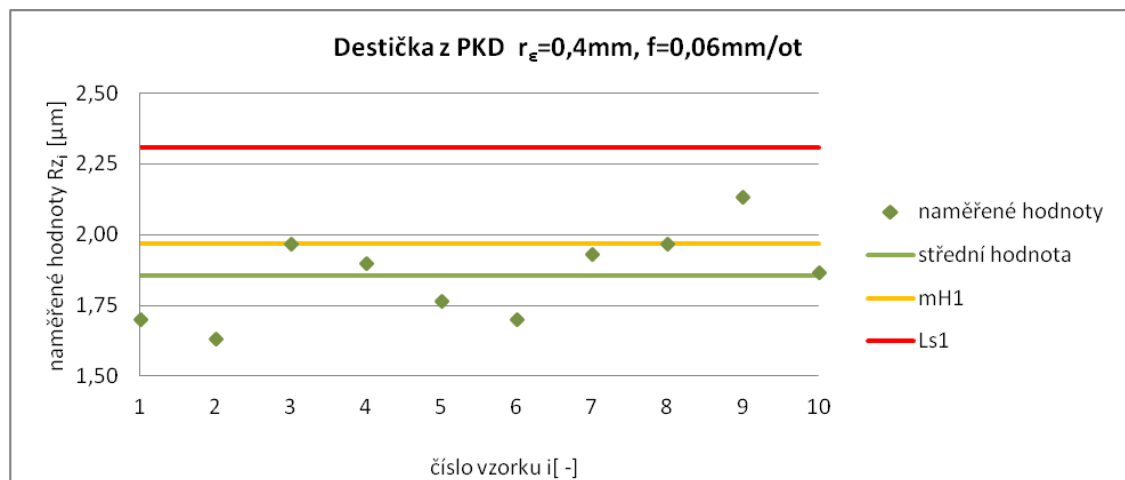
Obr. 3.23 Nejvyšší výška profilu Rz_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace.
Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,02\text{mm/ot}$



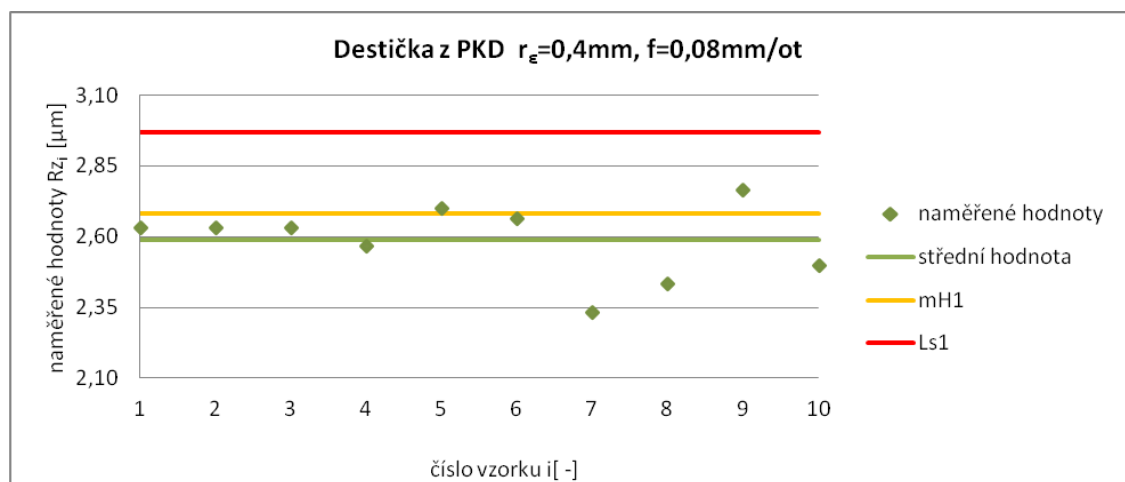
Obr. 3.24 Nejvyšší výška profilu Rz_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace.
Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,036\text{mm/ot}$



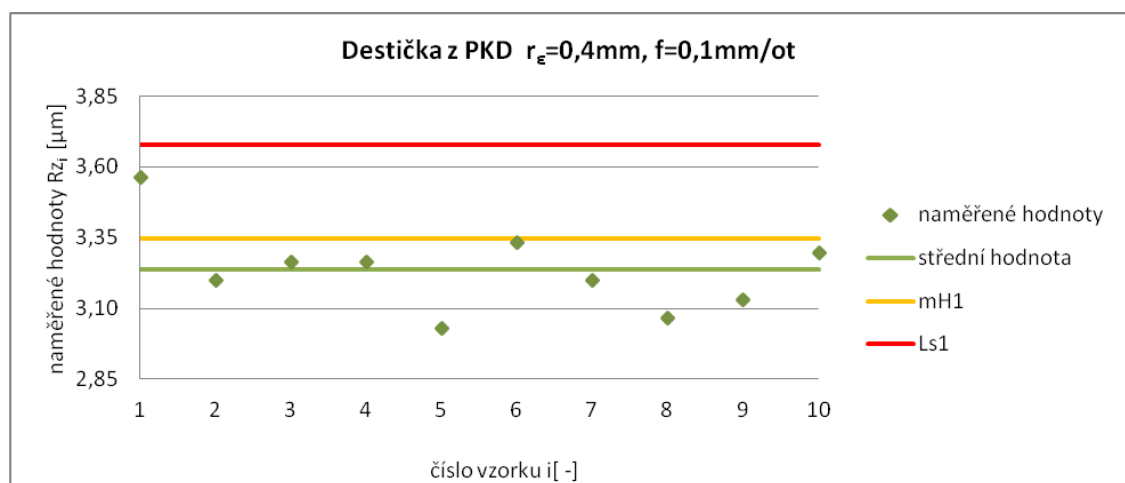
Obr. 3.25 Nejvyšší výška profilu Rz_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace.
Destička z SK o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,05\text{mm/ot}$



Obr. 3.26 Nejvyšší výška profilu Rz_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z PKD o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,06\text{mm/ot}$



Obr. 3.27 Nejvyšší výška profilu Rz_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z PKD o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,08\text{mm/ot}$



Obr. 3.28 Nejvyšší výška profilu Rz_i zkušebních vzorků a jejich statistická interpretace. Destička z PKD o $r_{\epsilon}=0,4\text{mm}$, $f=0,1\text{mm/ot}$

3.6 Technicko-ekonomické zhodnocení

V technicko-ekonomickém zhodnocení je uvedeno srovnání využití břitové destičky z SK ($r_\epsilon = 0,2 \text{ mm}$, $f = 0,036 \text{ mm/ot}$) a PKD ($r_\epsilon = 0,4 \text{ mm}$, $f = 0,06 \text{ mm/ot}$).

Stanovení jednotkového strojního času pro podélné soustružení (3):

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} [\text{min}] \quad (3.9)$$

Kde: L ... dráha nástroje ve směru posuvu [mm],
 n ... otáčky obrobku [min^{-1}],
 f ... posuv na otáčku obrobku [mm].

Výpočet strojního času pro destičku z SK ($r_\epsilon = 0,2 \text{ mm}$, $f = 0,036 \text{ mm/ot}$):

$$t_{ASSK} = \frac{56}{2810 \cdot 0,036} = 0,554 \text{ min}$$

Výpočet strojního času pro destičku z PKD ($r_\epsilon = 0,4 \text{ mm}$, $f = 0,06 \text{ mm/ot}$):

$$t_{ASPKD} = \frac{56}{2810 \cdot 0,06} = 0,332 \text{ min}$$

Pořizovací cena vyměnitelné břitové destičky z SK: 402 Kč

Pořizovací cena vyměnitelné břitové destičky z PKD: 1434 Kč

Náklady na 1 hod provozu stroje: 1200 Kč/hod = 20 Kč/min

Výpočet nákladů stroje na vyrobený 1 ks pro SK:

$$N_{ksSK} = 0,554 \cdot 20 = 11,08 \text{ Kč / ks}$$

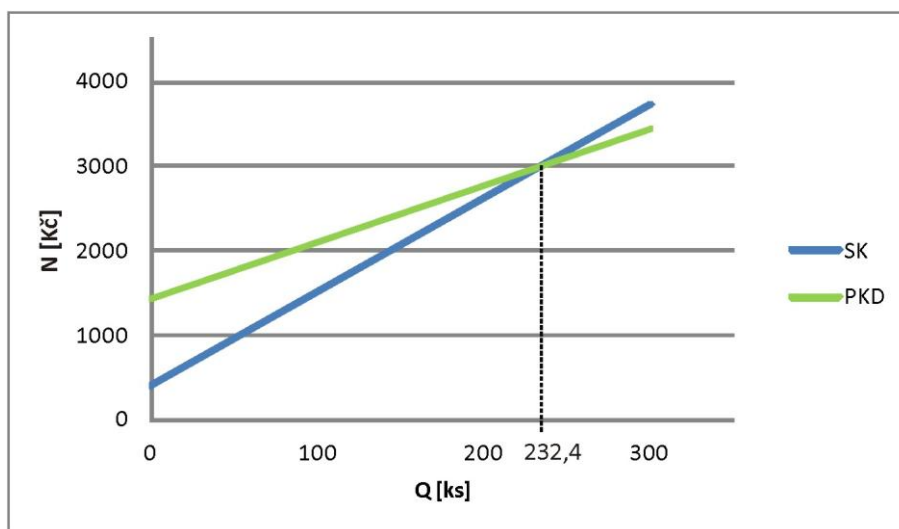
Výpočet nákladů stroje na vyrobený 1 ks pro PKD:

$$N_{ksPKD} = 0,332 \cdot 20 = 6,64 \text{ Kč / ks}$$

Hodnota počtu kusů, kdy dojde k rovnosti nákladů pro destičky z SK a PKD:

$$Q = \frac{P_{cPKD} - P_{cSK}}{N_{ksSK} - N_{ksPKD}} = \frac{1434 - 402}{11,08 - 6,64} = 232,4 \text{ ks}$$

Při vyrobení 233 kusů součástí dojde k srovnání nákladů pro destičku z SK a PKD. Od 234 vyrobených kusů je z ekonomického hlediska výhodnější použití destičky z PKD.



Obr. 3.29 Grafické znázornění rovnosti nákladů destiček z SK a PKD

Z technologického hlediska je nutné počítat s trvanlivostí bříty nástroje, což je doba, po kterou je nástroj schopen efektivně plnit požadované funkce. Trvanlivost bříty je obecně závislá na řezných podmínkách a popisuje se jednoduchým Taylorovým vztahem (viz. vzorec 3.9). Exponent m charakterizuje vlastnosti řezného materiálu, konstanta C_T závisí na materiálu obrobku. S lepšími vlastnostmi řezného materiálu se snižuje hodnota exponentu m a tím pádem dochází k navýšení trvanlivosti nástroje.³

Závislost trvanlivosti bříty nástroje T na řezných podmínkách (3):

$$T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m} [\text{min}] \quad (3.10)$$

Kde: v_c ... řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 m ... exponent [-],
 C_T ... konstanta [-].

V reálném procesu mají na trvanlivost nástroje vliv i jiné aspekty než řezné podmínky. Prakticky (firmou CIE Ždánice) bylo zjištěno, že nástroj ze slinutého karbidu, pro dokončení povrchu součásti primárního pístu brzdového válce dosahuje trvanlivosti $T_{SK} = 830$ min, což odpovídá přibližně 1500 ks vyrobené součásti. Z teorie pro výpočet trvanlivosti nástroje můžeme vycházet, že břitová destička z polykrystalického diamantu bude dosahovat vyšší trvanlivosti než ze slinutého karbidu. To vede k další úspoře nákladů na danou operaci.

4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Pro daný experiment bylo provedeno obrobení součástí ze slitiny hliníku pomocí břitových destiček PKD o poloměru špičky nástroje r_ϵ 0,4 mm a destiček z leštěného nepovlakovaného slinutého karbidu o poloměru špičky r_ϵ 0,2 a 0,4 mm. Průměrná aritmetická úchylka profilu obrobené součásti musí splňovat požadavky dle výkresové dokumentace. Parametr R_a nesmí převýšit hodnotu 0,4 μm . Tohoto požadavku bylo dosaženo za použití břitové destičky ze slinutého karbidu ($r_\epsilon = 0,2$ mm, $f = 0,036$ mm/ot) a destičky z polykrystalického diamantu ($r_\epsilon = 0,4$ mm, $f = 0,06$ mm/ot).

Použitím nástroje z polykrystalického diamantu lze dosáhnout požadovaných hodnot parametru R_a jako u destičky ze slinutého karbidu, ale za lepších řezných podmínek (dvojnásobně vyšší posuv). V případě, že by obráběná součást byla ze stabilnější hliníkové slitiny (více obsahu Si), nedocházelo by k vibracím na konci součásti. Mohlo by být použito mnohem vyšší řezné rychlosti, což by vedlo ke zkrácení strojního času a tím pádem ke snížení nákladů na výrobu dané součásti.

Pro experiment byla provedena statistická interpretace naměřených hodnot. Byly zjištěny meze pro konfidenční interval střední hodnoty parametru R_a a R_z obrobené plochy, které limitují skutečnou velikost střední hodnoty parametru R_a a R_z obrobené plochy s 95 % pravděpodobností. Dále byl zjištěn statistický toleranční interval parametru R_a a R_z , jenž 95 % pravděpodobností pokrývá podíl souboru, z kterého pochází náhodný výběr.

V kapitole 3.3 je provedeno srovnání teoretických hodnot R_a a R_z s naměřenými hodnotami. Z průběhu křivek je patrné, že výsledky při použití břitové destičky z PKD jsou téměř shodné s teoretickými hodnotami. To je způsobeno vhodnějšími vlastnostmi pro obrábění hliníkových slitin. U destiček ze slinutého karbidu dochází k navýšení parametrů R_a a R_z oproti teoretickým hodnotám. Při posuvu 0,02 mm/ot u SK dochází k zhoršení kvality povrchu než u posuvu 0,036 mm/ot. Ten by se dal specifikovat jako posuv kritický. Při nižší hodnotě již nástroj „neřeže“ a dochází k tlačení materiálu.

Při posouzení všech hledisek lze konstatovat, že pro danou technologickou operaci je výhodnější použití břitové destičky z polykrystalického diamantu. A to pro svou vysokou trvanlivost břitu nástroje, jež vede ke snížení celkových nákladů a dosažení požadované kvality obrobené plochy za vyšších řezných podmínek. I když je jeho pořizovací cena čtyřnásobně vyšší než u destiček ze slinutého karbidu.

5. ZÁVĚR

Tato diplomová práce analyzuje vybrané dokončovací způsoby obrábění. V teoretické části studie jsou postupně analyzovány jednotlivé metody abrazivního obrábění, beztržkové metody dokončovacího procesu a jemného obrábění s využitím řezných materiálů jako jsou například slinutý karbid nebo tzv. „supertvrdé“ řezné materiály (PKD a PKNB).

Dokončovacím obráběním dosáhneme geometrických změn a vzniku nových vlastností povrchové vrstvy obráběné součásti. Tyto vlastnosti se komplexně nazývají integritou povrchu obrobene součásti. Jednotlivými složkami jsou drsnost, rozměrová přesnost, zbytková napětí a zpevnění v povrchové vrstvě obrobku, na které mají dokončovací způsoby obrábění zásadní vliv.

Z hlediska budoucnosti a vývoje dokončovacích způsobů obrábění, kdy je zapotřebí jednotlivé procesy zrychlovat, zpřesňovat a nahlížet na ně z ekonomického pohledu, bude dle mého názoru zapotřebí integrovat technologie do stávajícího procesu. Z toho velký potenciál k dosažení těchto podmínek má technologie válečkování a využití řezných materiálů ze slinutého karbidu, cermetu, řezné keramiky, polykrystalického diamantu a kubického nitridu boru.

V praktické části byl proveden experiment technologie jemného soustružení s využitím řezného materiálu z nepovlakovaného slinutého karbidu a polykrystalického diamantu pro výrobu primárního pístu brzdového válce, kde má být dosaženo hodnoty průměrné aritmetické úchyly profilu Ra 0,4 μm . Pro jednotlivé řezné materiály bylo provedeno srovnání naměřených hodnot Ra a Rz s hodnotami teoretickými, statistická interpretace naměřených hodnot a technicko-ekonomické zhodnocení. Ze všech vyšetřovaných hledisek vyšlo pro dokončovací operaci součásti ze slitiny hliníku lépe využití břitových destiček z polykrystalického diamantu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. Příručka *obrábění – kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. KOČMAN, Karel. *Speciální technologie – Obrábění*. 2. vyd. Brno: PC-DIR Real, 1998. 236 s. ISBN 80-214-1187-2.
3. KOČMAN, Karel. A Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
4. ČSN ISO 3207. *Statistická interpretace údajů. Stanovení statistického tolerančního intervalu*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 30 s.
5. SUNNEN Products company [online]. [cit. 2011-28-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.sunnen.com>>.
6. MÁDL, Jan; Jindřich KAFKA; Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK. *Technologie obrábění – 3.díl*. Praha: Vyd. ČVUT, 2000. 81 s. ISBN 80-01-02091-6.
7. PR HOFFMAN Machine Products, Inc. [online]. [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW : <<http://www.prhoffman.com>>.
8. PÍŠKA, M a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8
9. YAMASA. [online]. [cit. 2011-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.yamasa.com.tr>>.
10. BAUBLIES AG. [online]. [cit. 2011-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.baublies.com>>.
11. ALBA precision. [online]. [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.albaprecision.cz>>.
12. PROKOP, J. a POTÁČEL, V. Predikce parametrů drsnosti povrchu obrobené plochy při jemném soustružení. *Strojírenská technologie*. Červen 1999, roč. IV, č. 2, s. 4-7. ISSN 1211-4162
13. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Vydavatelství MM publishing, s.r.o. Praha, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
14. BECKER DIAMANTWERKZEUGE. [online]. [cit. 2011-05-10]. Dostupné z WWW: <http://www.beckerdiamant.de/files/pkd-katalog_web_engl.pdf>.
15. SECO. PCBN. [online]. [cit. 2011-29-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.secotools.com/cs/Global/Products/Advanced-cutting-materials/PCBN>>.
16. BUMBÁLEK, Bohumil. *Vysoce přesné metody obrábění a jejich fyzikální podstata*. [online]. [cit. 2011-28-09]. Dostupné z WWW: <<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/vys.presne.met.obr.pdf>>.
17. NOVÁK, Martin a František HOLEŠOVSKÝ. *Studium integrity broušeného povrchu*. [online]. [cit. 2011-28-09]. Dostupné z WWW: <<http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf08/2-str-11-13.pdf>>.
18. ČECH, Jaroslav; Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. Vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 176s. ISBN 80-214-3070-2.

19. MÁDL, Jan; Jindřich KAFKA; Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK.
Technologie obrábění – 1.díl. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 79 s.
ISBN 80-01-02091-6.
20. BUMBÁLEK, Bohumil. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. Kvalita a geometrická specifikace produktů.* Brno: VUT v Brně, 2005. ISSN 1801-5352.
21. SUGINO MACHINE LIMITED. [online]. [cit. 2011-10-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.sugino.cz/pdf/Sugino%20SUPEROLL%20L2215CZ.pdf>>.
22. SANDVIK COROMANT. [online]. [cit. 2011-11-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.coromant.sandvik.com/>>.
23. TUNGALOY. [online]. [cit. 2011-13-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.tungaloy.co.jp/common/products/pdf/354.pdf>>.
24. GONTERMANN-PEIPERS GMBH [online]. [cit. 2011-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.gontermann-peipers.de/en/products/cast-products/lapping-tools/>>
25. SUPFINA GRIESHABER. [online]. [cit. 2011-13-10]. Dostupné z WWW:
<http://www.supfina.com/Bilder/Supfina_90_e.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
\bar{x}	-	Střední hodnoty
\overline{Ra}	μm	Odhad střední hodnoty parametru Ra obrobené plochy
\overline{Rz}	μm	Odhad střední hodnoty parametru Rz obrobené plochy
$1-\alpha$	-	Konfidenční úroveň
a	mm	Amplituda
Al_2O_3	-	Oxid hlinitý (umělý korund)
a_{pmin}	mm	Minimální hloubka řezu
Co	-	Kobalt
C_T	-	Konstanta Taylorva vztahu
D	mm	Průměr obráběné plochy
d_s	mm	Průměr brousicího kotouče
d_w	mm	Průměr obrobku
f	mm.ot^{-1}	Posuv na otáčku
F	N	Přítlačná síla
HRC	-	Tvrdost podle Rockwella
HV	-	Tvrdost podle Vickerse
h_z	mm	Hloubka zpevněné vrstvy
IT	-	Přesnost rozměrů
k_1	-	Součinitel pro meze jednostranného statistického tolerančního intervalu parametru přesnosti obrobené plochy
L	mm	Dráha nástroje ve směru posuvu
l_p	mm	Vzdálenost od povrchu
L_{s1}	-	Jednostranný statistický toleranční interval
L_{s1Ra}	μm	Horní mez jednostranného statistického tolerančního intervalu parametru Ra obrobené plochy
L_{s1Rz}	μm	Horní mez jednostranného statistického tolerančního intervalu parametru Rz obrobené plochy
m	-	Exponent Taylorva vztahu
m_{H1}	-	Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty
m_{H1Ra}	μm	Horní mez jednostranného konfidenčního intervalu střední hodnoty parametru Ra obrobené plochy
m_{H1Rz}	μm	Horní mez jednostranného konfidenčního intervalu střední

		hodnoty parametru Rz obrobené plochy
Mo	-	Molybden
n	-	Počet pozorovaných prvků
N	Kč	Náklady na danou technologii
NbC	-	Karbid niobu
Ni	-	Nikl
N _{ks}	Kč	Náklady stroje na jeden kus
n _s	min ⁻¹	Frekvence otáčení brousicího kotouče
n _w	min ⁻¹	Frekvence otáčení obrobku
P _c	Kč	Požizovací cena nástroje
p _k	MPa	Přítlačný tlak
PKD (PCD)	-	Polykrystalický diamant
PKNB (KNB, CBN)	-	Kubický nitrid boru
Q	ks	Počet vyrobených součástí
r	mm	Poloměr nástroje
R _a	μm	Průměrná aritmetická úchylka profilu
R _{a_t}	μm	Teoretická průměrná aritmetická úchylka profilu
R _p	μm	Největší výška výstupku profilu
R _q	μm	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
R _t	μm	Celková výška profilu
R _y	μm	Největší výška profilu
R _z	μm	Nejvyšší výška profilu
R _{z_t}	μm	Teoretická nejvyšší výška profilu
r _ε	mm	Poloměr špičky nástroje
s	-	Směrodatná odchylka
Si	-	Křemík
Si ₃ N ₄	-	Nitrid křemíku
SiC	-	Karbid křemíku
SK	-	Slinutý karbid
s _{Ra}	μm	Odhad směrodatné odchylky parametru R _a obrobené plochy
s _{Rz}	μm	Odhad směrodatné odchylky parametru R _z obrobené plochy
T	min	Trvanlivost břitu nástroje
TaC	-	Karbid tantalu
t _{AS}	min	Strojní čas pro podélné soustružení
TiC	-	Karbid titanu
TiCN	-	Karbonitrid titanu
TiN	-	Nitrid titanu
V _c	m.min ⁻¹	Řezná rychlost pro soustružení, honování
V _c	m.s ⁻¹	Řezná rychlost pro broušení
V _f	m.min ⁻¹	Posuvová rychlost

v_k	$m \cdot min^{-1}$	Rychlost kmitavého pohybu
v_w	$m \cdot min^{-1}$	Obvodová rychlost pro broušení, superfinišování
WC	-	Karbid wolframu
ω_k	min^{-1}	Frekvence kmitavého pohybu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výrobní výkres primárního pístu brzdového válce

